ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΤΗ ΦΥΕ

Ανιχνευτές και Μεθοδολογία

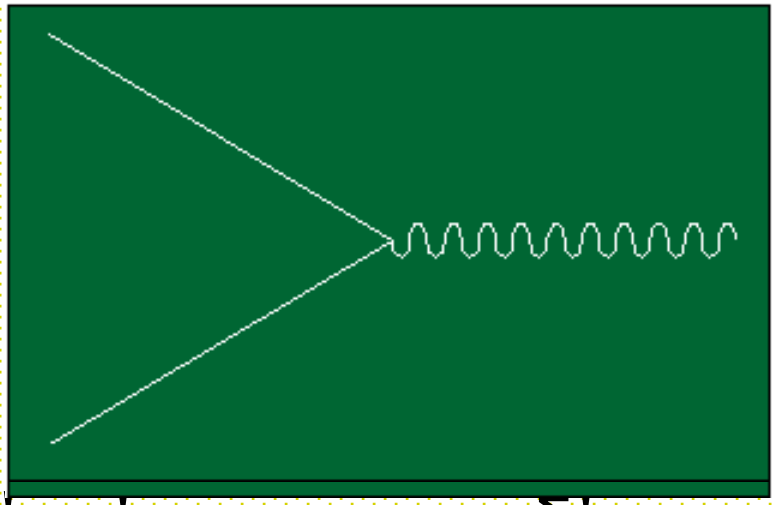
Ευάγγελος Ν. Γαζής, Καθηγητής ΕΜΠ
Βενέτης Πολυχρονάκος, Διευθυντής Ερευνών BNL

Σύνοψη

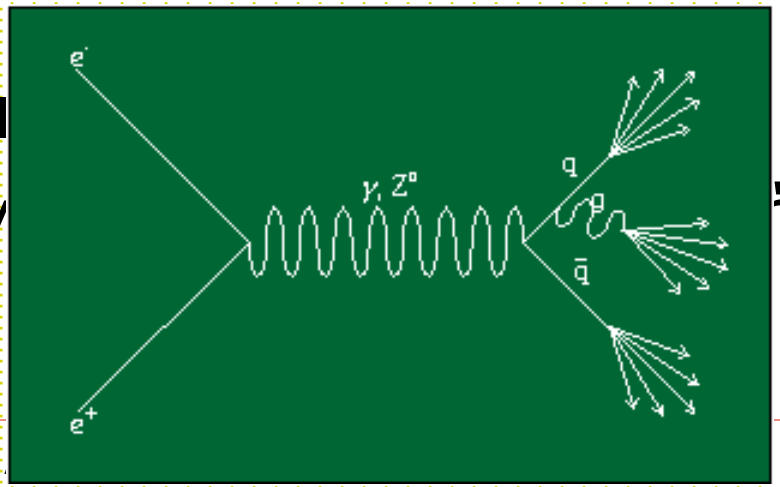
- Εισαγωγή και Αντικείμενο Μελέτης
- Ιδιότητες των Στοιχειωδών Σωματιδίων
  - Ποιές ποσότητες μετράμε?
  - Πώς τις μετράμε?
- Ανιχνευτές ΦΥΕ @ CERN
  - Κύρια Ανιχνευτικά Συστήματα
  - Υποδομή

Μελέτη Αλληλεπιδράσεων

- Με σκέδαση
- Με εξαΰλωση



- και την παραγωγή νέων σωματιδίων
- ΟΛΕΣ οι αλληλεπι μέσω
  - Πειραμάτων συγ ή
  - Πειραμάτων στα



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

- Τί ιδιότητες έχει ένα σωματίδιο?
  - ενέργεια
  - ορμή
  - φορτίο
  - ~~μάζα~~
  - χρόνο ζωής
  - ~~ιδιοπεριστροφή~~ (spin)
  - διασπάσεις

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

- Ποιά απ' όλα αυτά είναι μετρήσιμα?

Ιδιότητες Σωματιδίων

Αν μετρήσουμε την ενέργεια και την ορμή

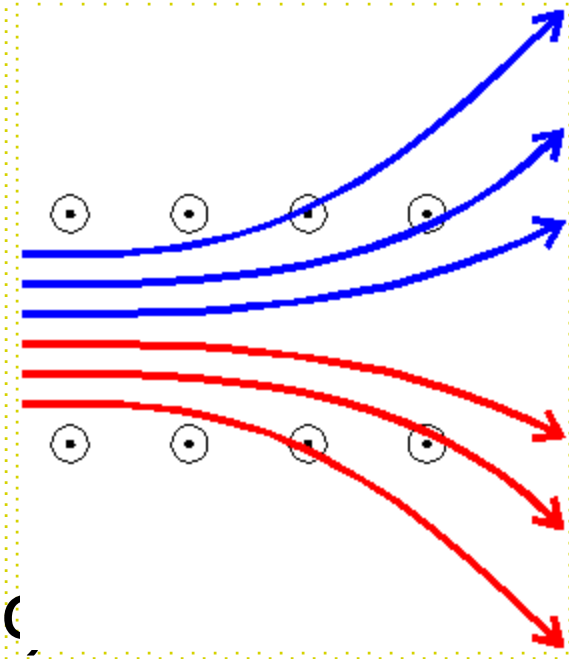
$$\left.\begin{matrix} E \\ \vec{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \end{matrix}\right\} \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$

- Ποιές άλλες ιδιότητες μπορούμε να βρούμε?

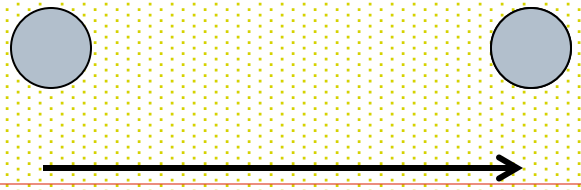
$$E^2 = m^2 \cdot c^4 + \vec{p}^2 c^2 \Rightarrow m = \frac{\sqrt{E^2 - \vec{p}^2 c^2}}{c^2}$$

Ιδιότητες Σωματιδίων

- φορτίο

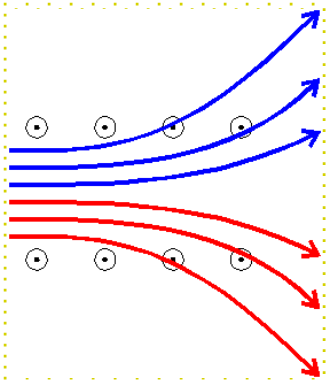


- Χρόνος ζωής



Μέτρηση των Ιδιοτήτων των Σωματιδίων

- ορμή



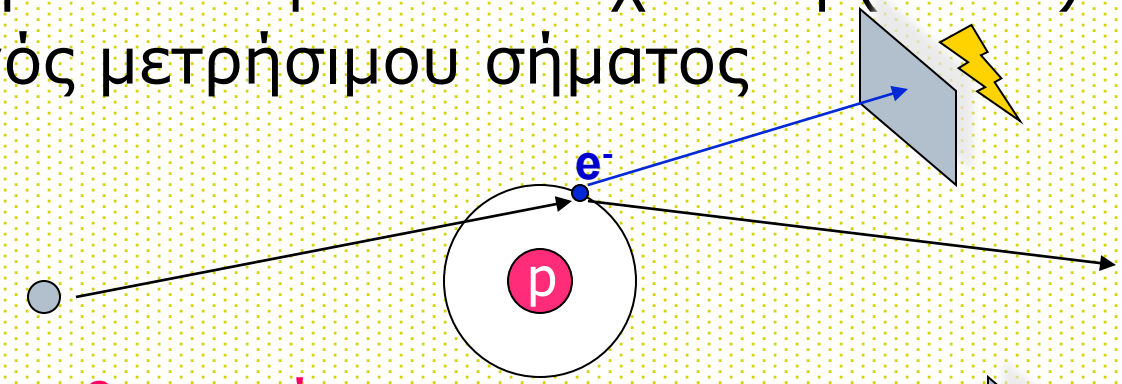
$$F = q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

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

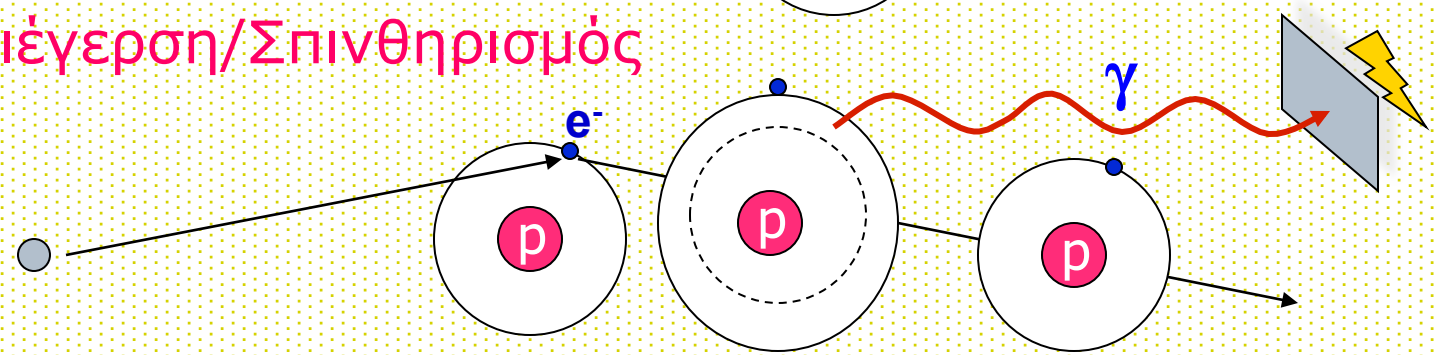
- ταχύτητα
  - χρόνος πτήσης
  - RICH (Ring Cherenkov Imaging)
- ενέργεια
  - θερμιδόμετρο

Βασικές Αρχές των Μετρήσεων

- Η μέτρηση γίνεται μέσω της 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

Ποιά Σωματίδια μπορούν να ανιχνευθούν?

- Φορτισμένα Σωματίδια

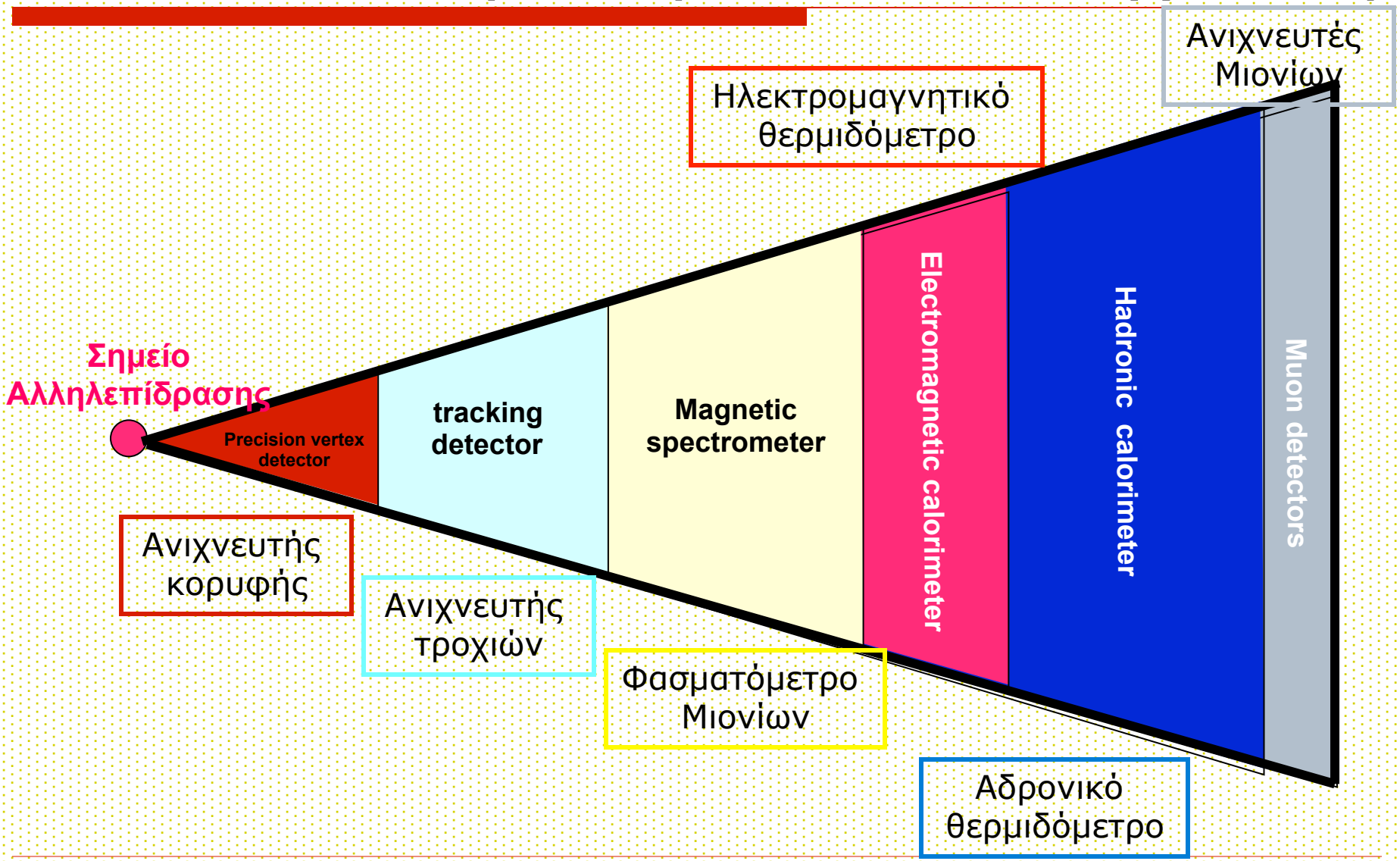
$$e^{+}, e^{-}, p, \pi^{\pm}, \mu^{\pm}$$

- Ουδέτερα Σωματίδια

$$\gamma, n, \pi^{0}, \nu$$

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

Η σύνθεση ενός τυπικού ανιχνευτή



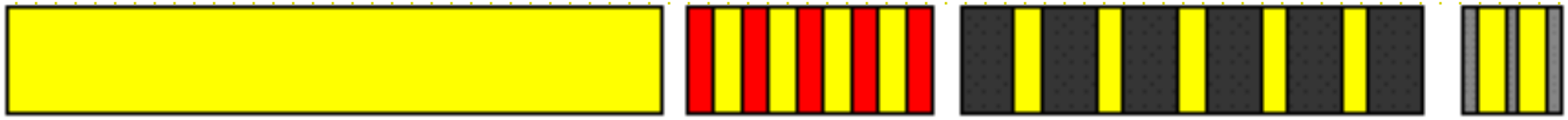
Διαμερίσεις των Υπο-ανιχνευτών

Υποσύστημα Τροχιών

Ηλεκτρομαγνητικό Θερμιδόμετρο

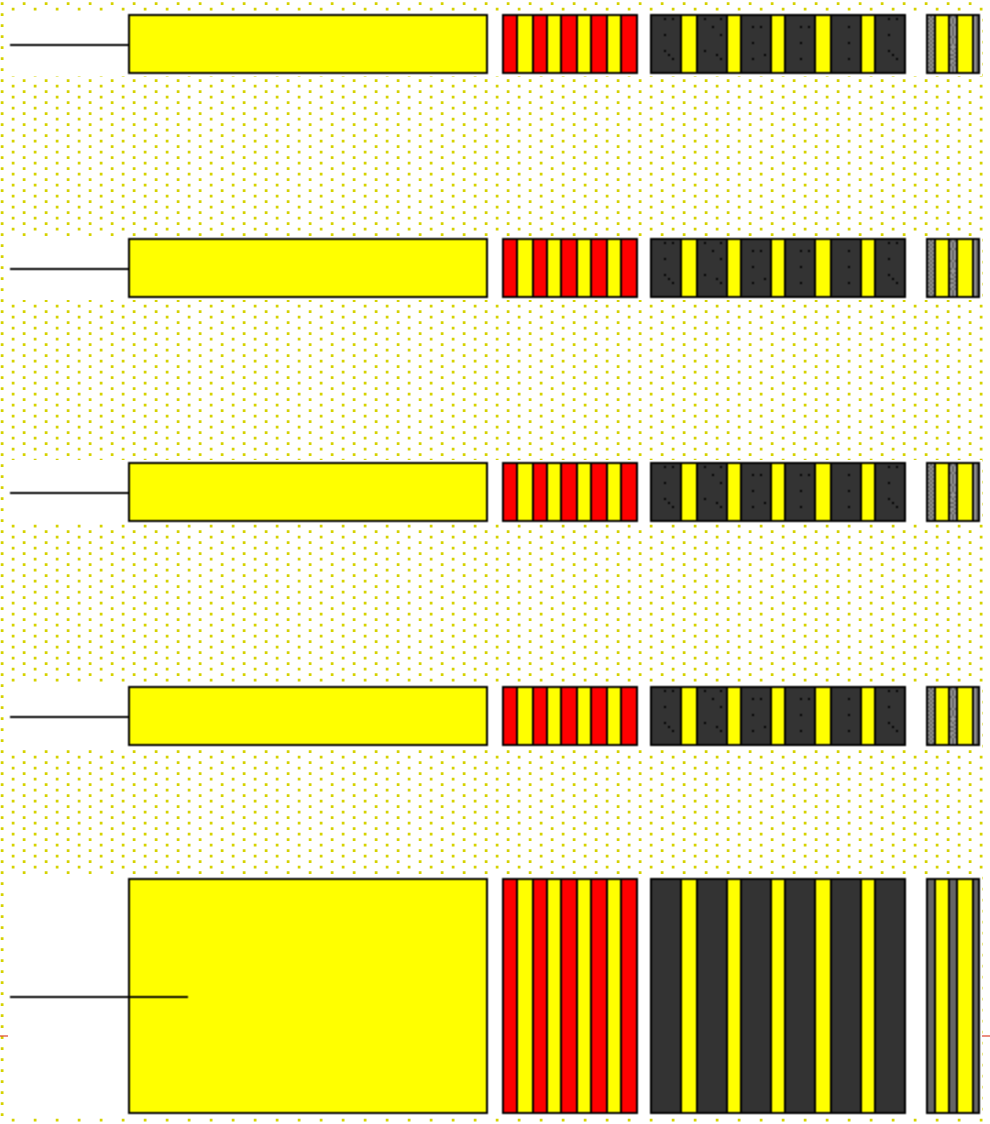
Αδρονικό Θερμιδόμετρο

Σύστημα Μιονίων



Διάβαση/Αλληπίδραση των Σωματιδίων

- Ηλεκτρόνια
- Φωτόνια
- Αδρόνια
- Μιόνια
- Μεσόνια

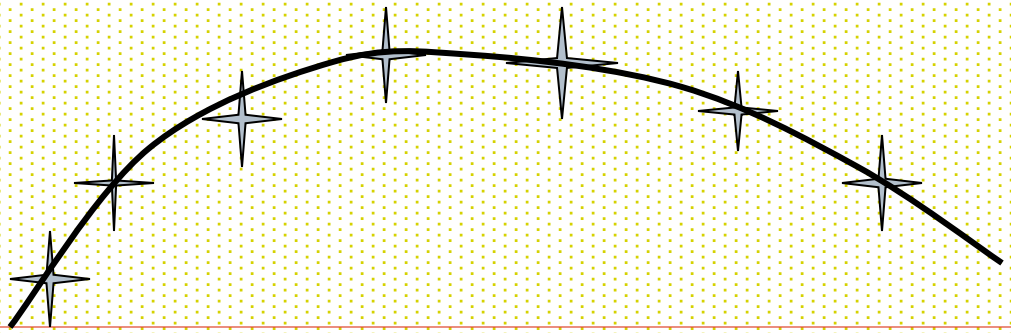


Ανιχνευτές Τροχιών

- μέτρηση των τροχιών των παραγόμενων σωματιδίων
- προσδιορίζουν
  - φορτίο και
  - ορμή

  σε συνδυασμό με το μαγνητικό πεδίο
- Οι τροχιές ανακατασκευάζονται από τα μετρηθέντα σημεία του χώρου:

ΔΕΝ χρησιμοποιείται πυκνό υλικό!



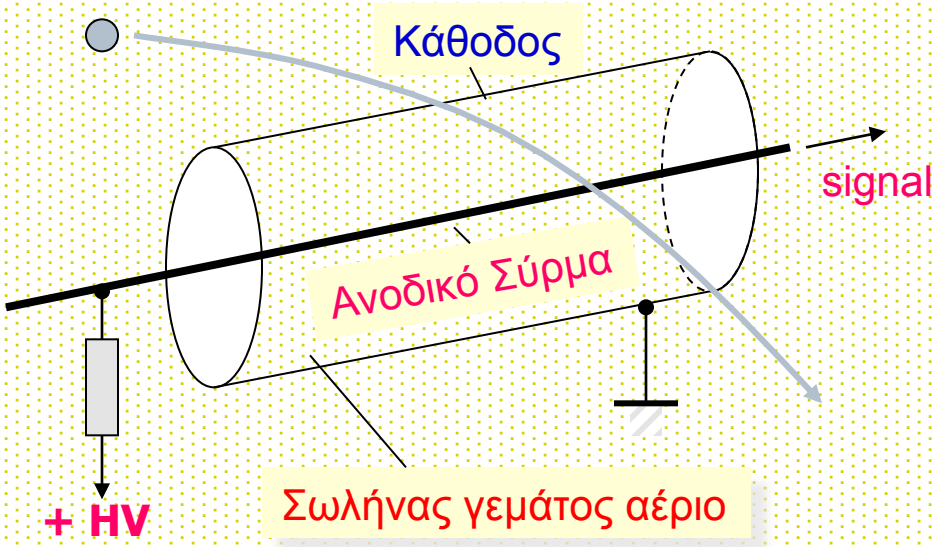
Πώς λειτουργούν οι ανιχνευτές τροχιών?

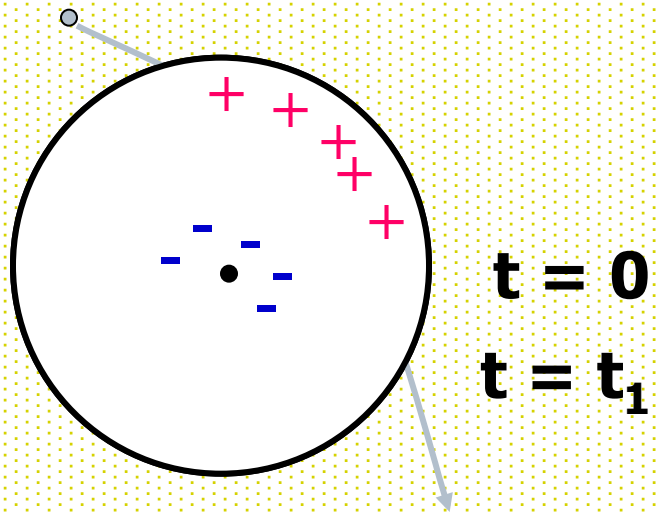
- Δύο βασικές αρχές
  - Ανιχνευτές Ιοντισμού
    - Geiger-Müller counter
    - MWPC
    - TPC
    - silicon detectors
  - Ανιχνευτές Σπινθηρισμού

Πολυ-Σύρματος Αναλογικός Θάλαμος
Multi-Wire Proportional Chamber

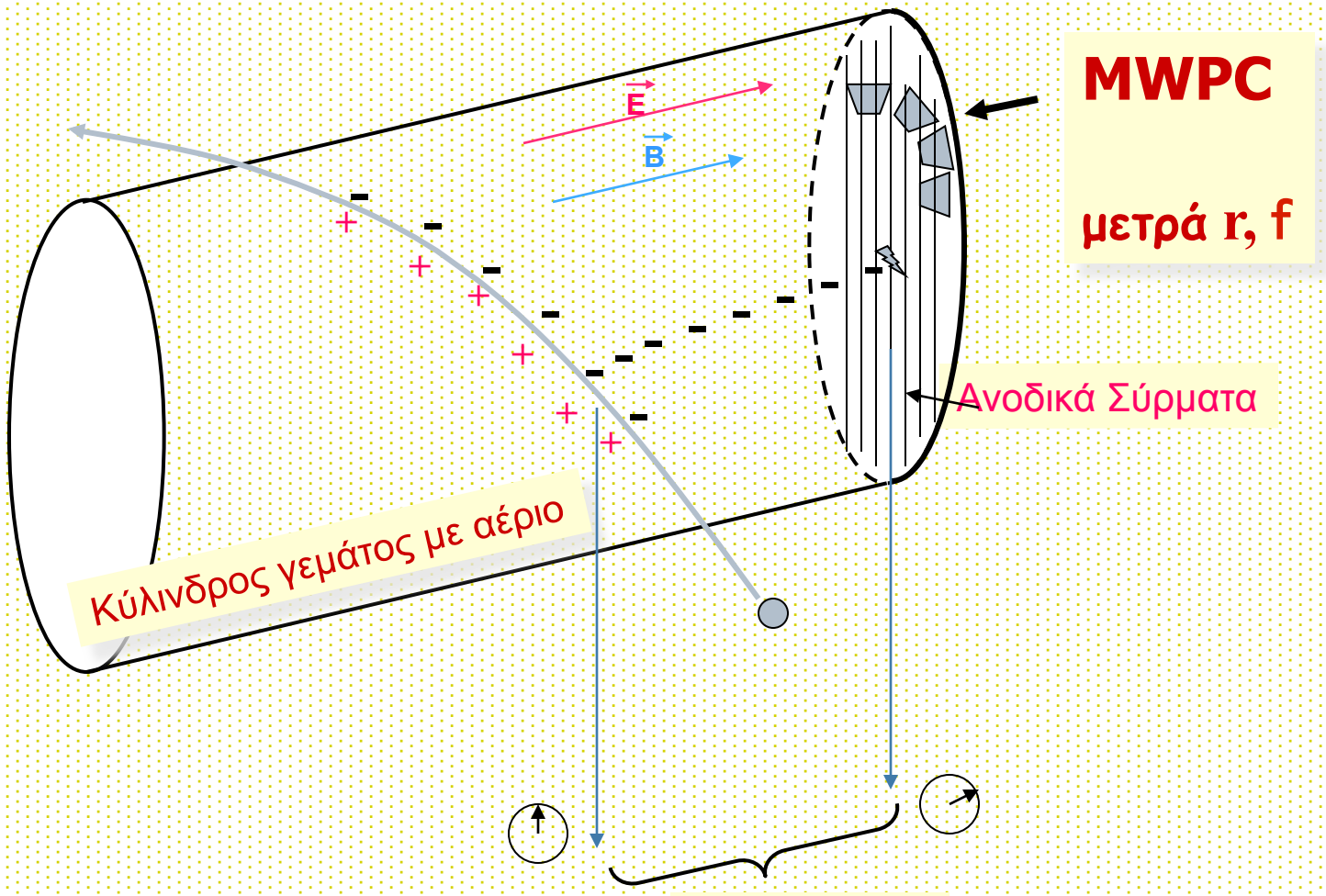
Θάλαμος Προβολικού Χρόνου
Time Projection Chamber

Μετρητές Ιοντισμού

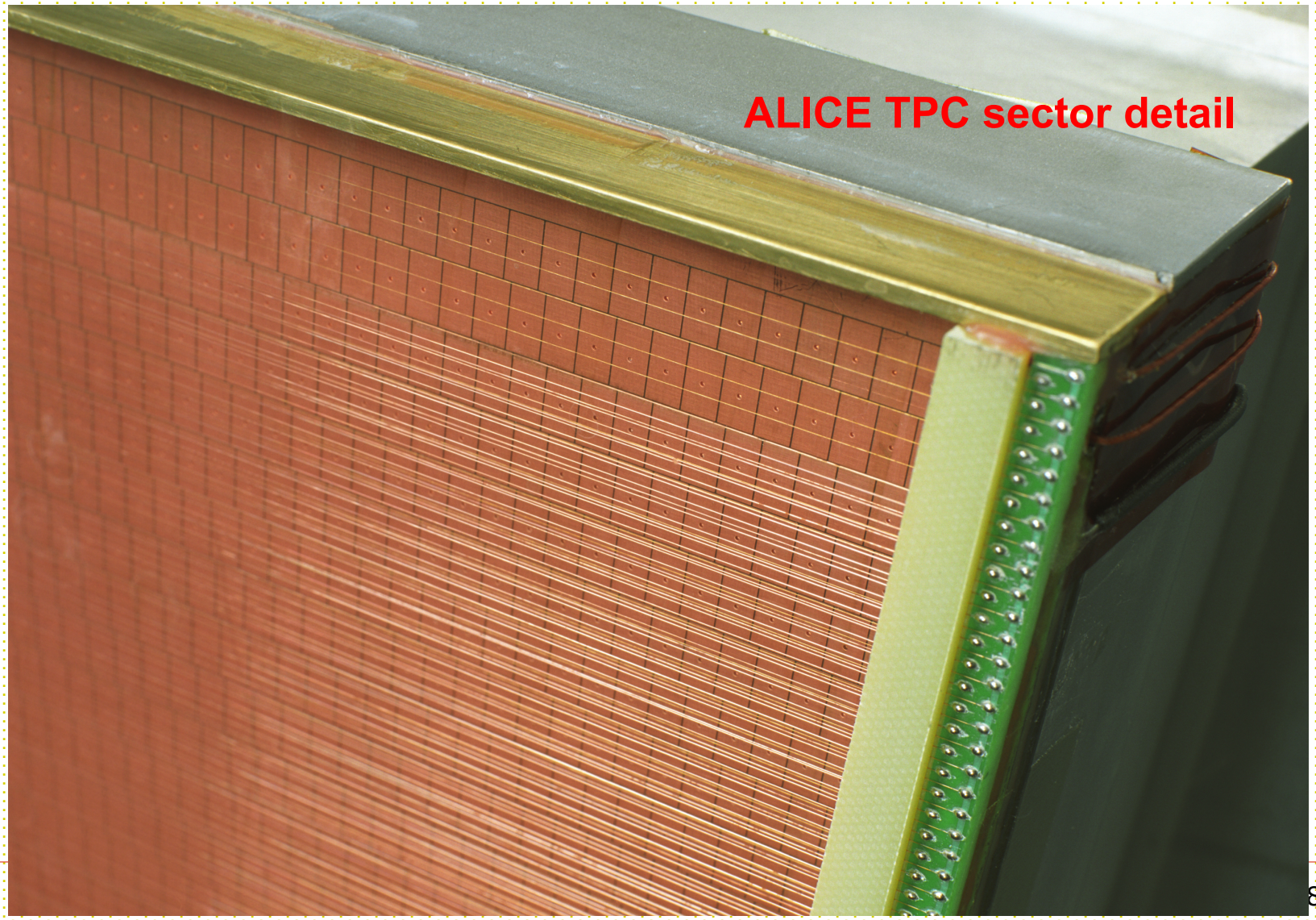




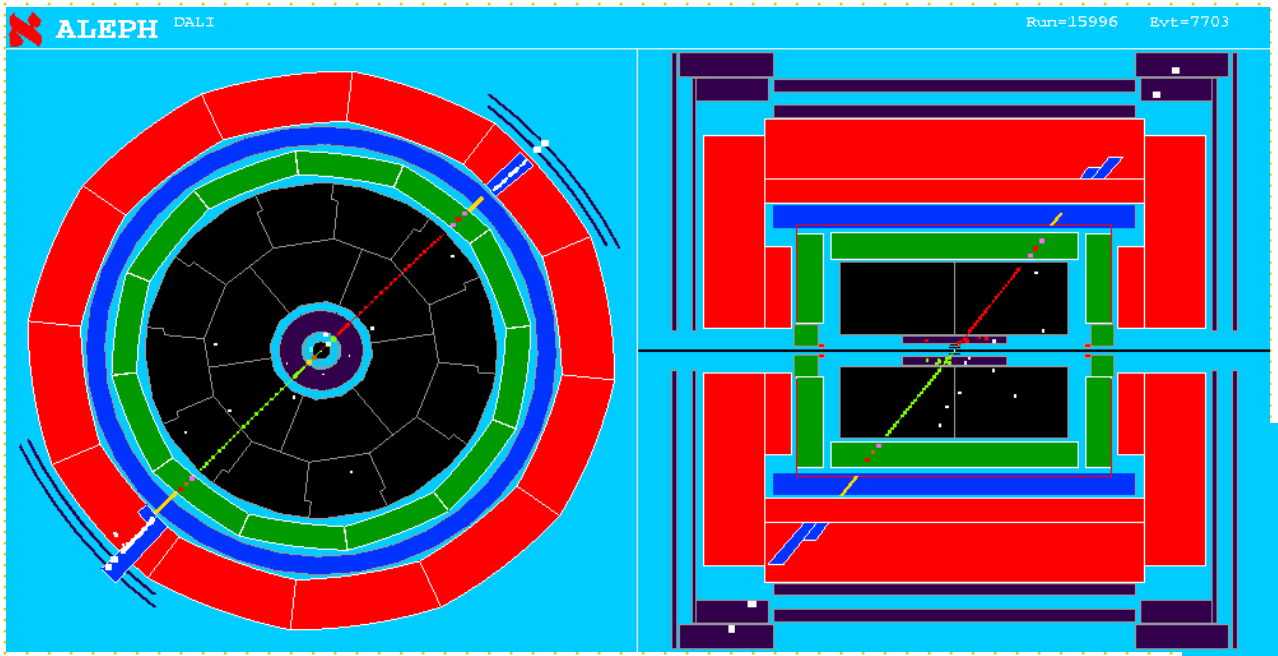
Θάλαμος Προβολικού Χρόνου (Time Projection Chamber)

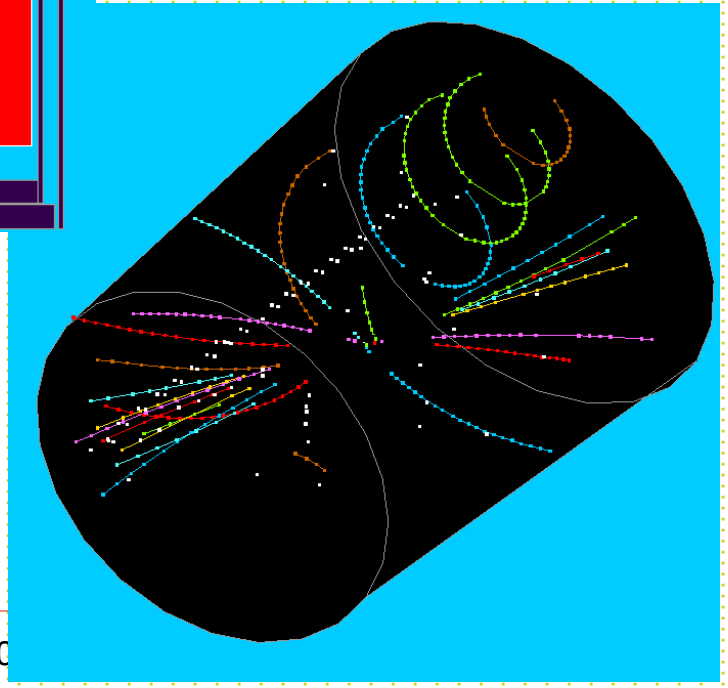


TPC

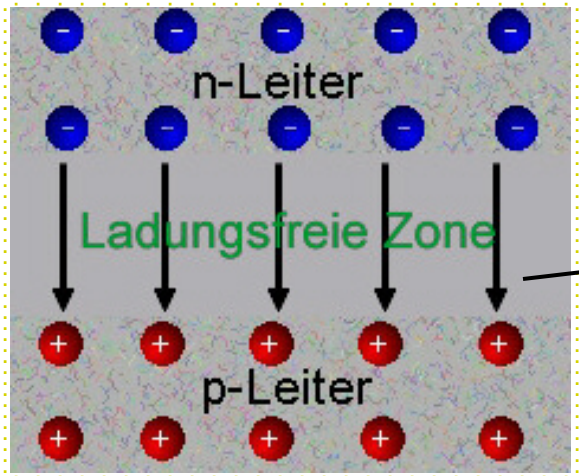


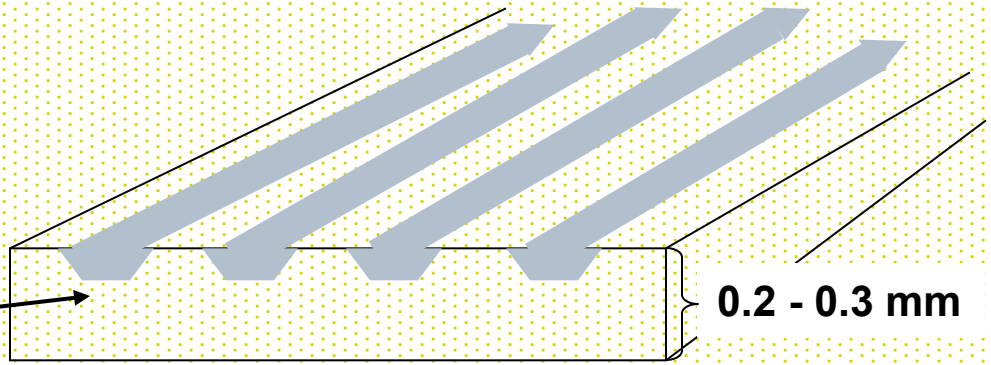
ALEPH TPC





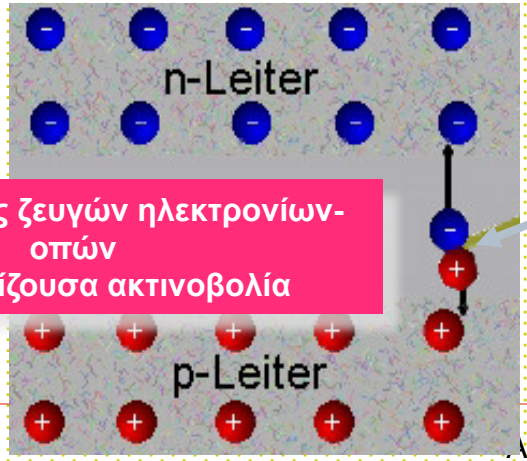
Ανιχνευτές Μικρολωρίδων Πυριτίου



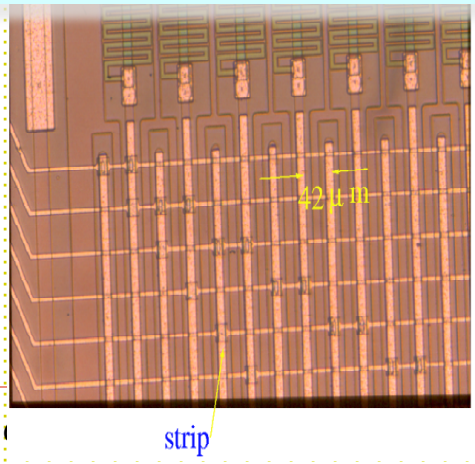


Ανιχν. πυριτίου

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

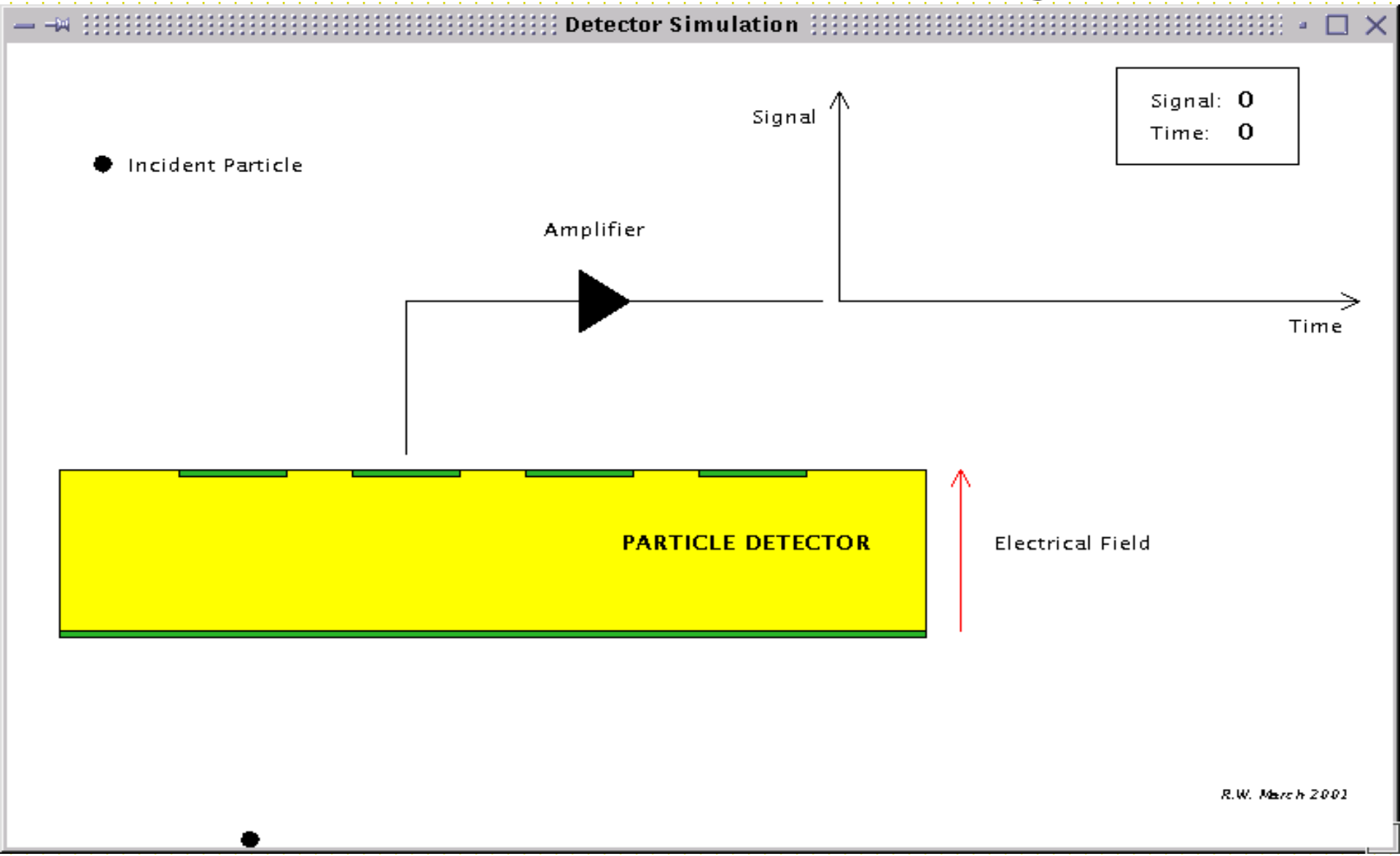


Σχηματισμός ζευγών ηλεκτρονίων-οπών
από ιοντίζουσα ακτινοβολία

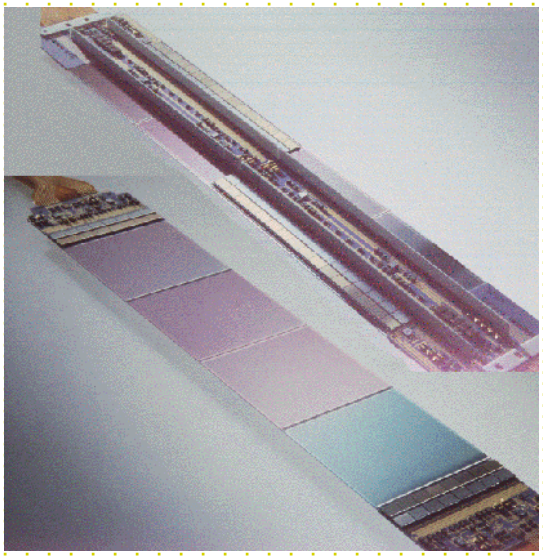


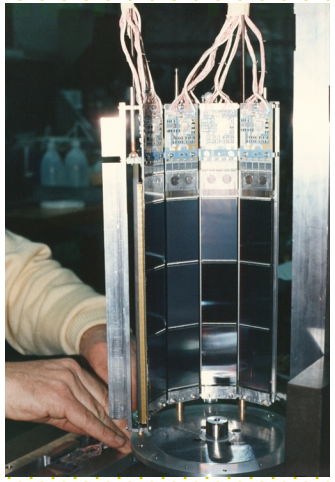
Ίδια αρχή με τους ανιχνευτές αερίου

Λειτουργούν κάπως έτσι:

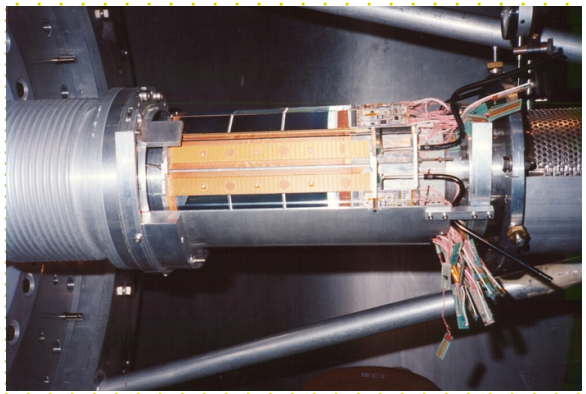


Ανιχνευτές Μικροταινιών Πυριτίου ....



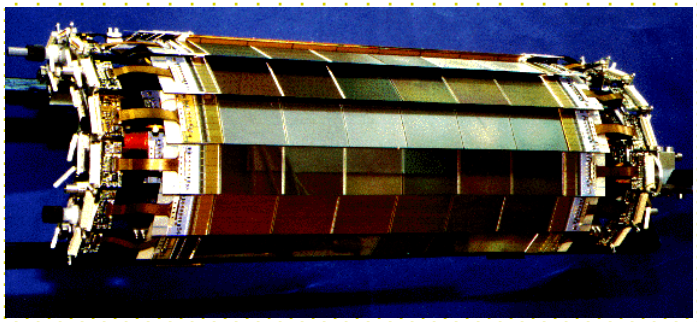


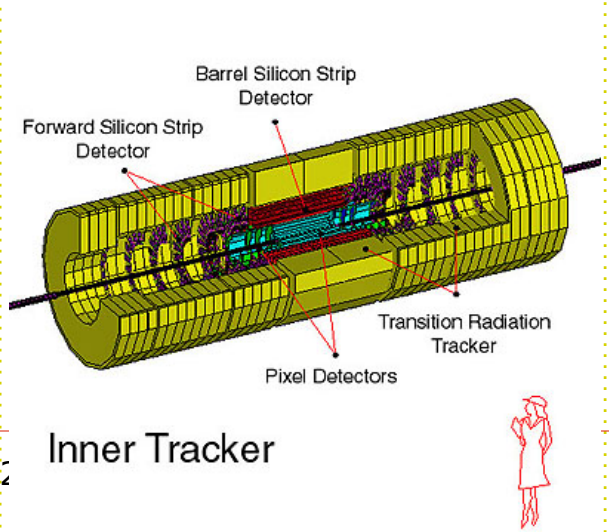
OPAL VDET



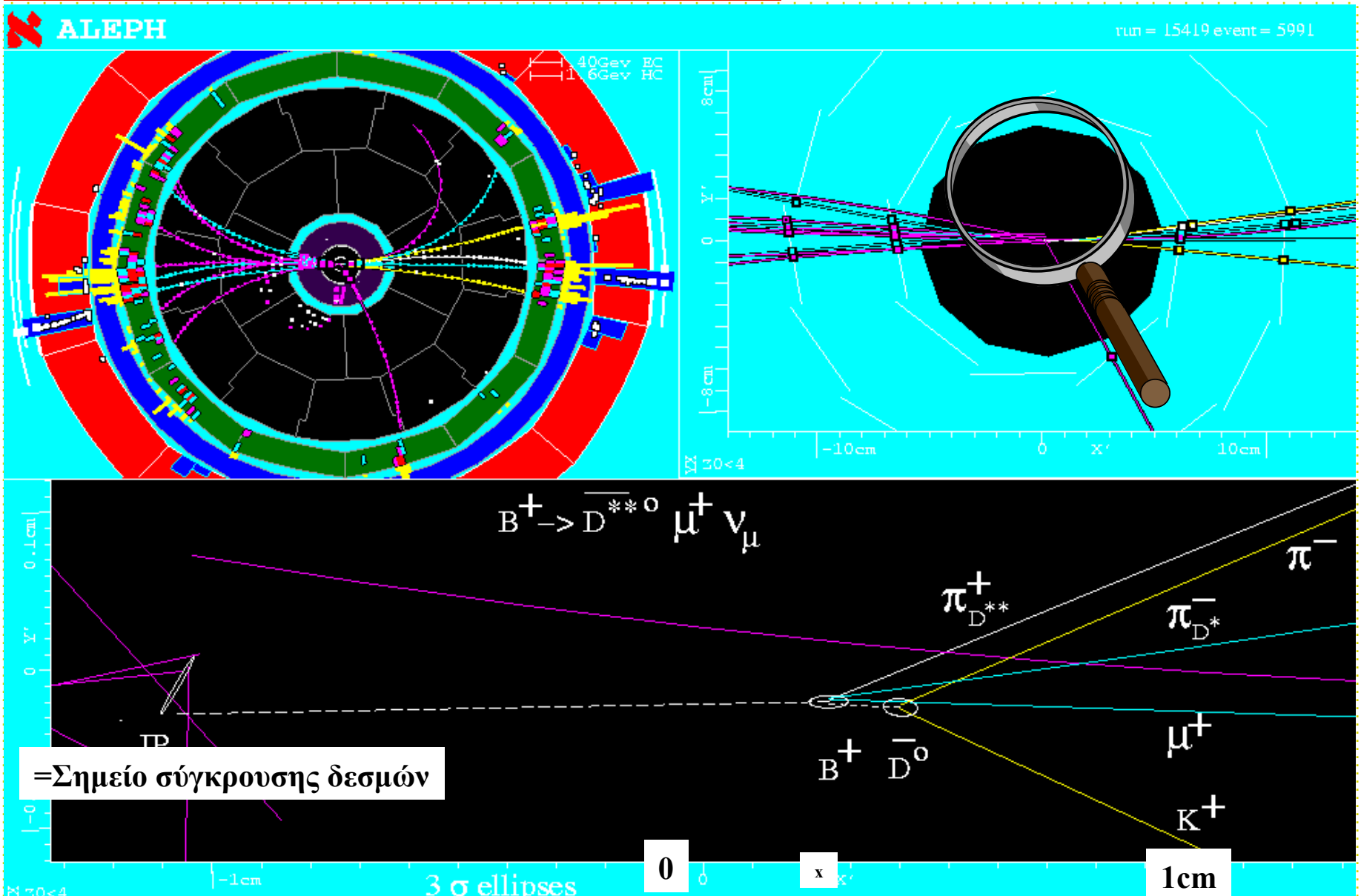
Ανιχνευτής τροχιών ATLAS

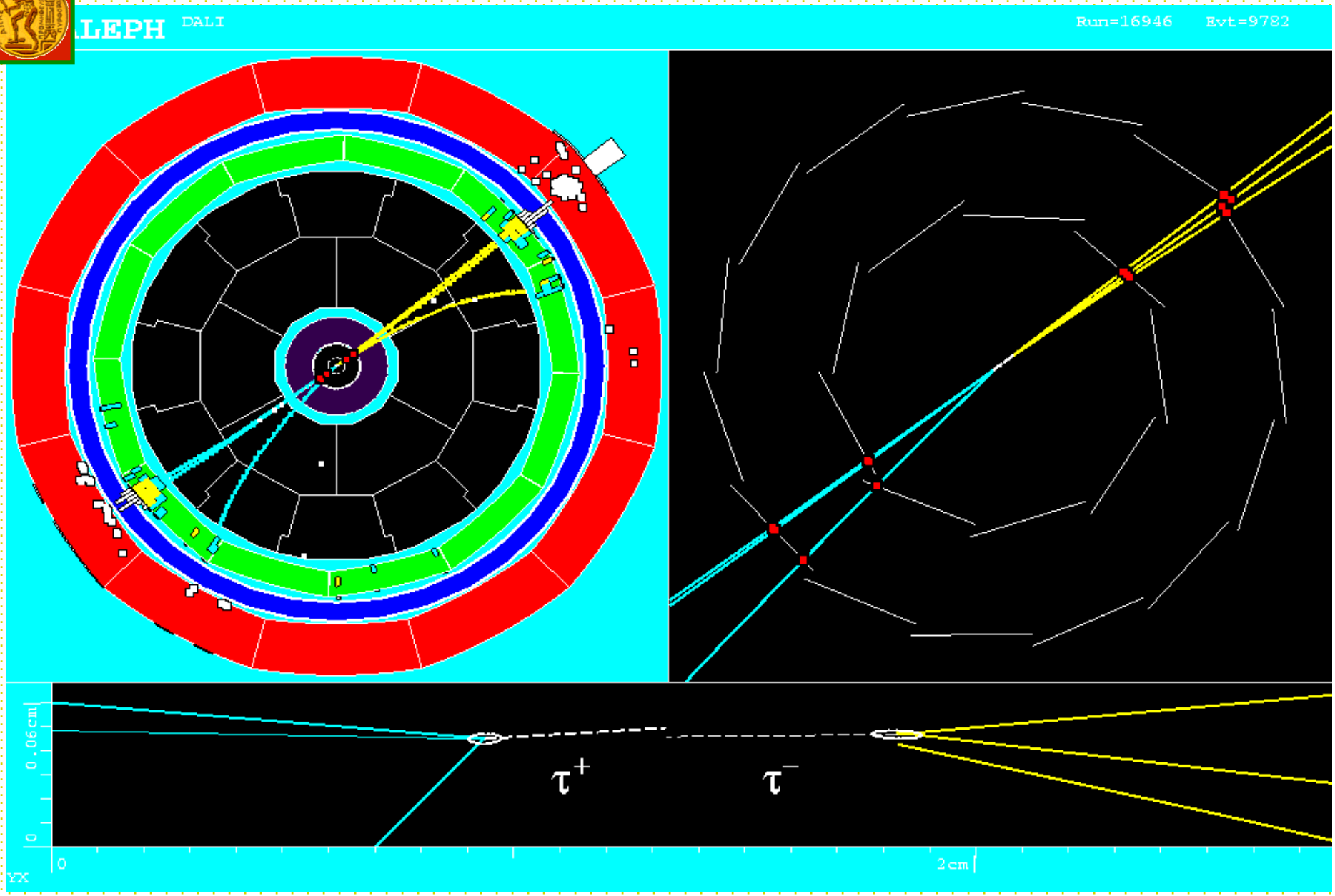
ALEPH VDET





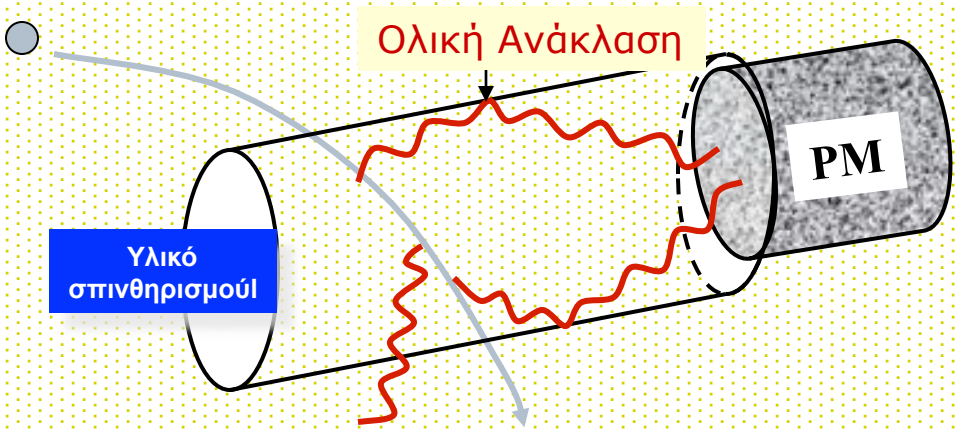
Εξαιρετική Ακρίβεια και ... διάκριση των τροχιών



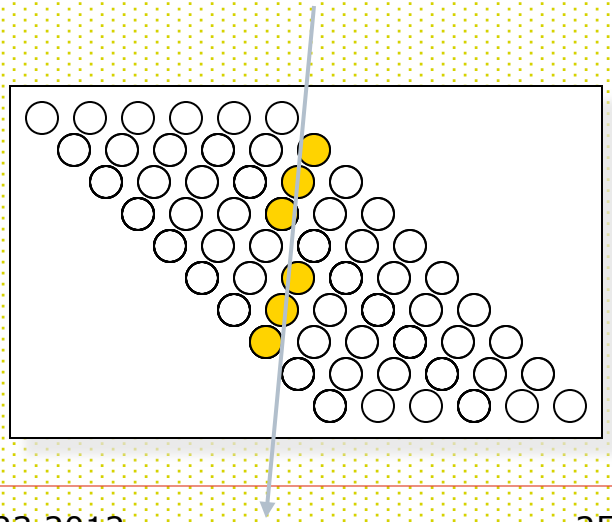


Μέσος χρόνος ημι-ζωής του tau t=290 x 10^{-15} sec !! --> ct = 87 mm !

Ανιχνευτές Σπινθηρισμού

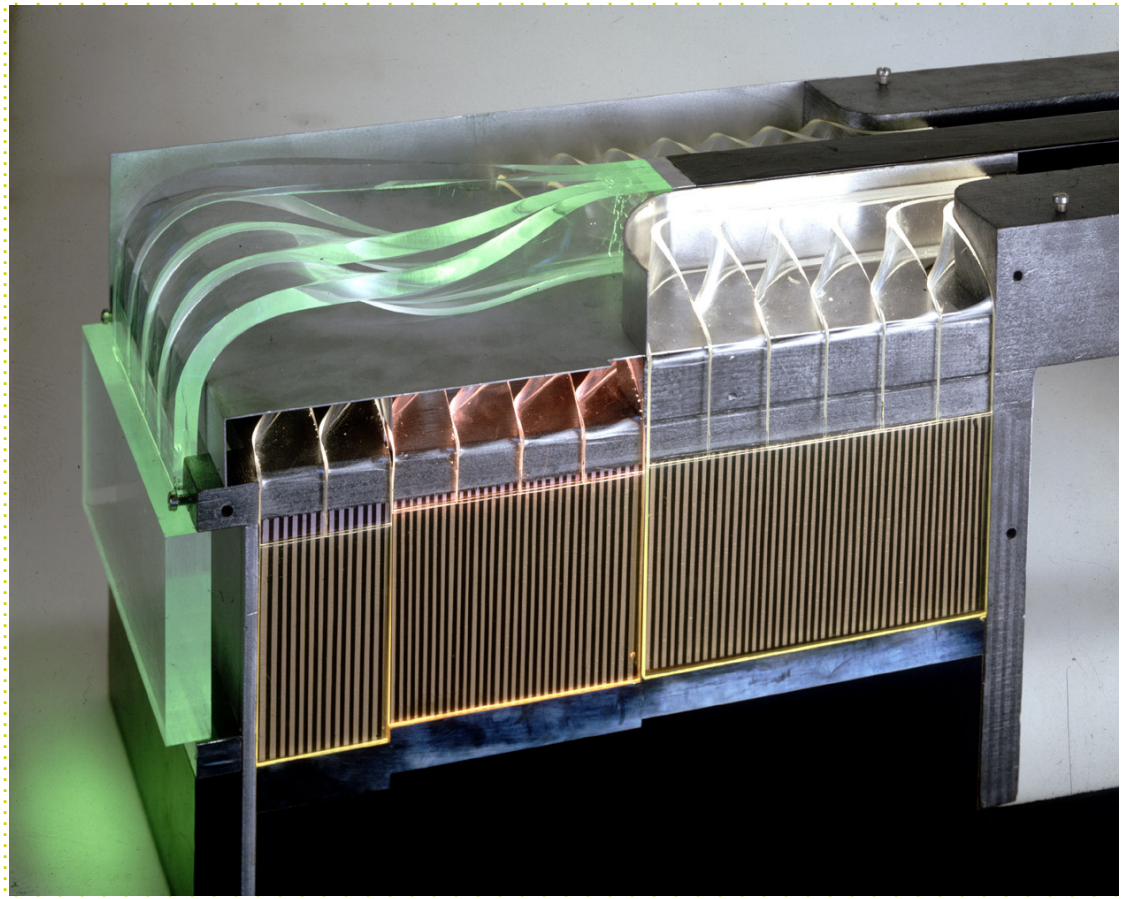


Φωτοπολλαπλασιαστής: μετατρέπει το φώς σε σήμα ηλεκτρονίων

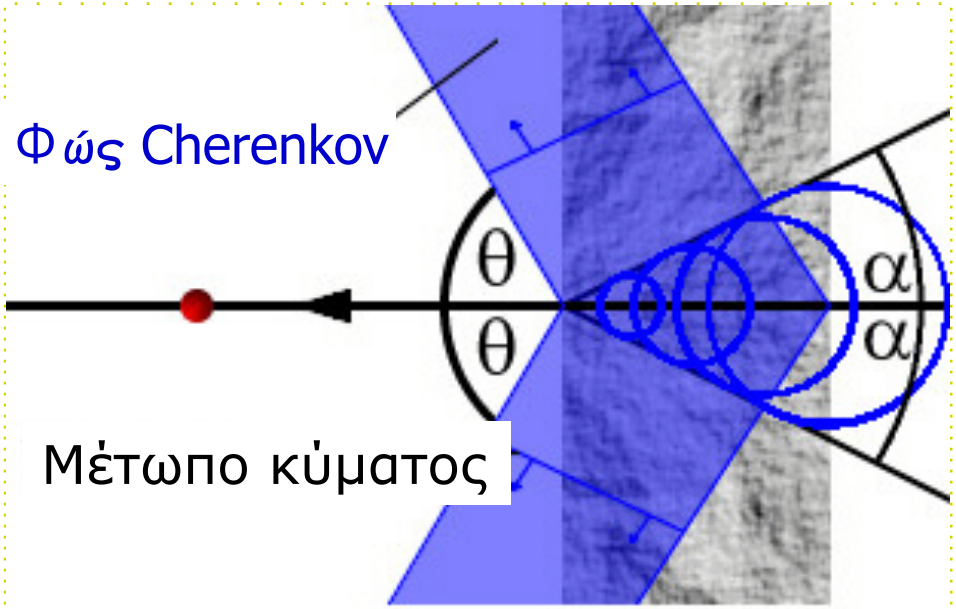


Χρησιμοποιώντας πολλές οπτικές ίνες πολύ κοντά
--> Γίνεται η τροχιά ορατή

Τώρα είμαστε έτοιμοι να ανιχνεύσουμε τις ακτινοβολίες:
Cherenkov και Διέλευσης



Ακτινοβολία Cherenkov



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

Ακτινοβολία Cherenkov

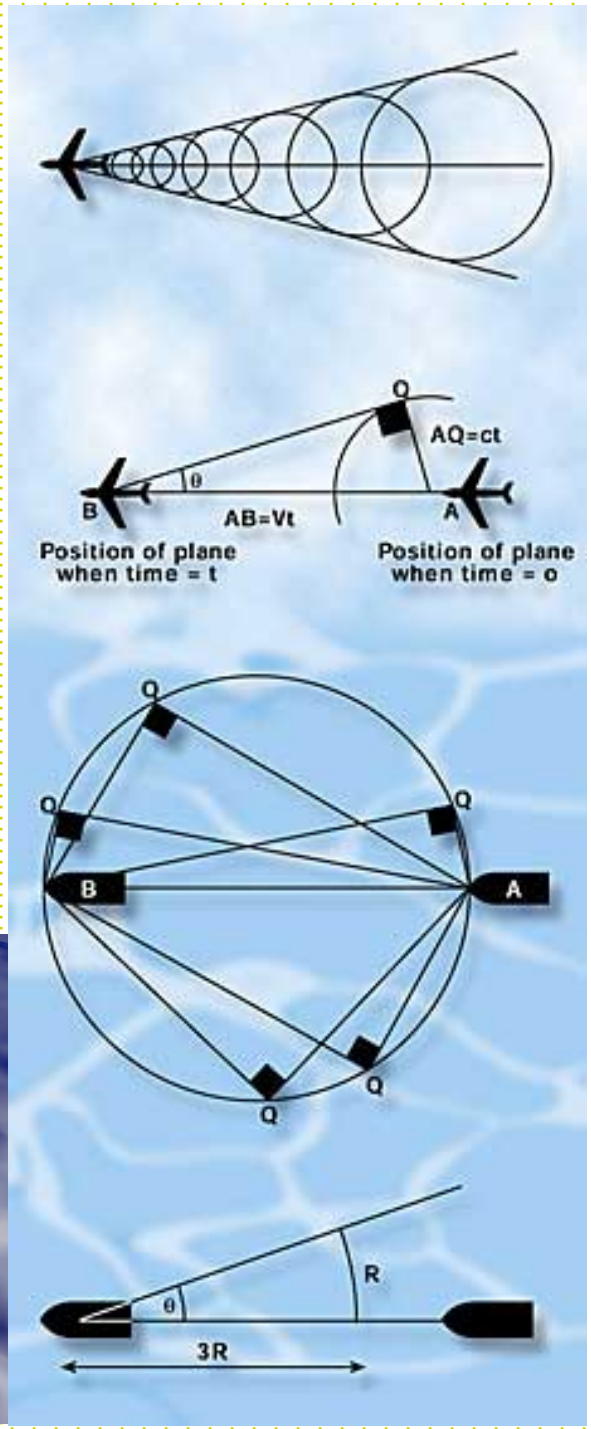
$$\sin\alpha = \frac{c}{v} = \frac{c_0}{n}\frac{1}{v} \Rightarrow \frac{c_0}{n}\frac{1}{v} = 0.5 \Rightarrow$$

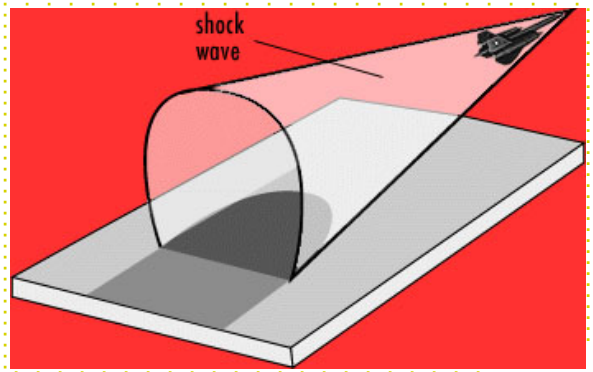
$$v = \frac{c_0}{1.5}\frac{1}{0.5} = \frac{2c_0}{1.5} > c_0$$

Αν έστω sinα=0.5 (α=30^0)
και η=1.5
c_0 = ταχύτητα φωτός στο κενό

Ακτινοβολία Cherenkov

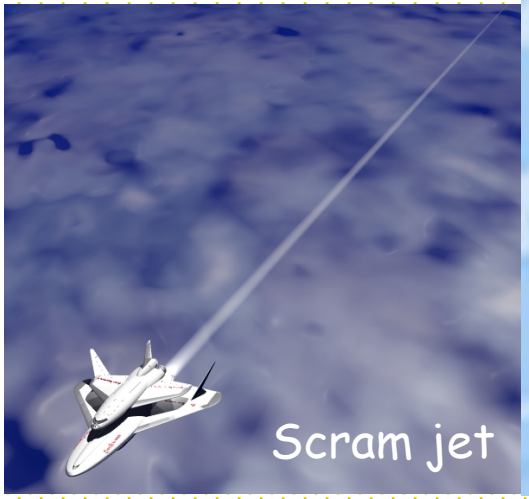
και
άλλα
κρουστικά
κύματα





Τα κρουστικά κύματα αλλοιώνουν τον προσανατολισμό των πουλιών

Ίσως και τα αντίστοιχα των ψαριών?

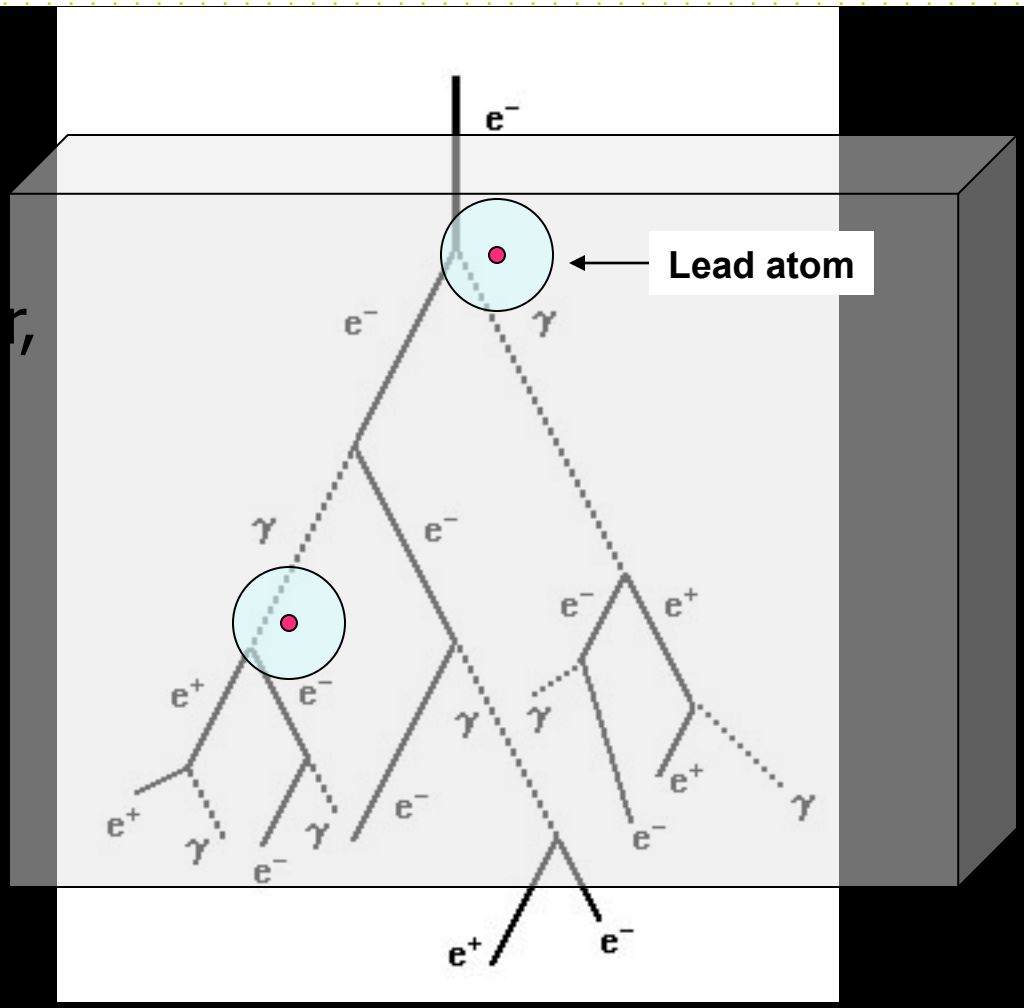


http://www.newscientist.com/lastword/answers/lwa674bubbles.html
http://www.pbs.org/wgbh/nova/barrier/

Θερμιδόμετρα

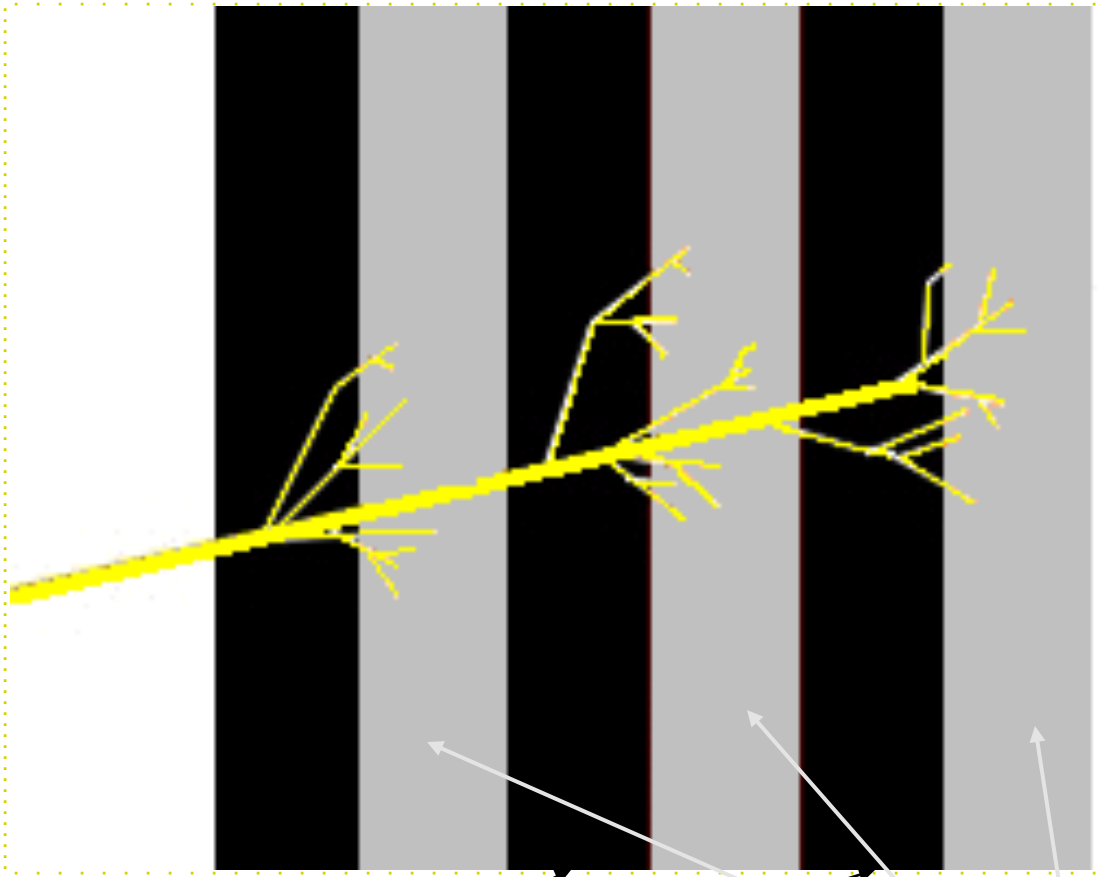
- Βασική Αρχή Λειτουργίας:
  - Κατά την αλληλεπίδραση του σωματιδίου με πυκνό υλικό ΟΛΗ, σχεδόν η ενέργειά του μετατρέπεται σε *δευτερογενή σωματίδια ή σε θερμότητα*.
  - Αυτά τα δευτερογενή σωματίδια καταγράφονται
    - πχ. Αριθμός, Ενέργεια, Πυκνότητα δευτερογενών
    - που είναι *ανάλογα με* την **αρχική** ενέργεια

Ηλεκτρομαγνητικοί Καταιγισμοί



Πώς μετράμε τα δευτερογενή σωματίδια?

- 1. Με **τα θερμιδόμετρα δειγματισμού**:



Δομή Sandwich !!!

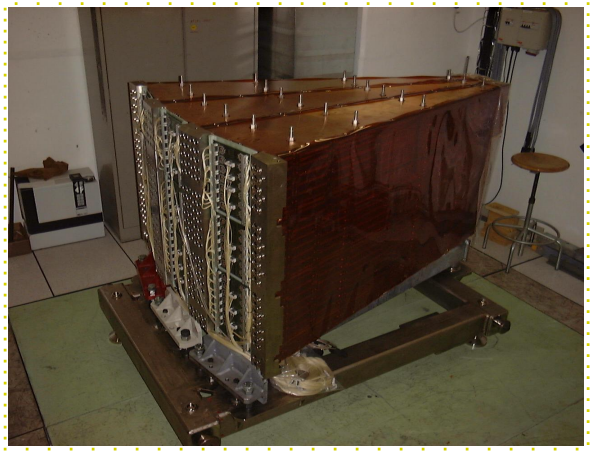
Το συνολικό ποσό σημάτων είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ενέργειας

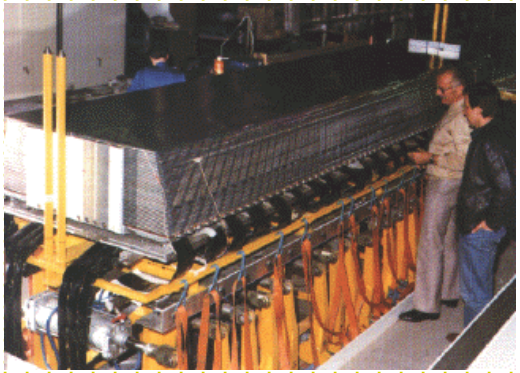
Αλλά χρειάζεται να βαθμονομηθεί με δέσμες γνωστής ενέργειας!

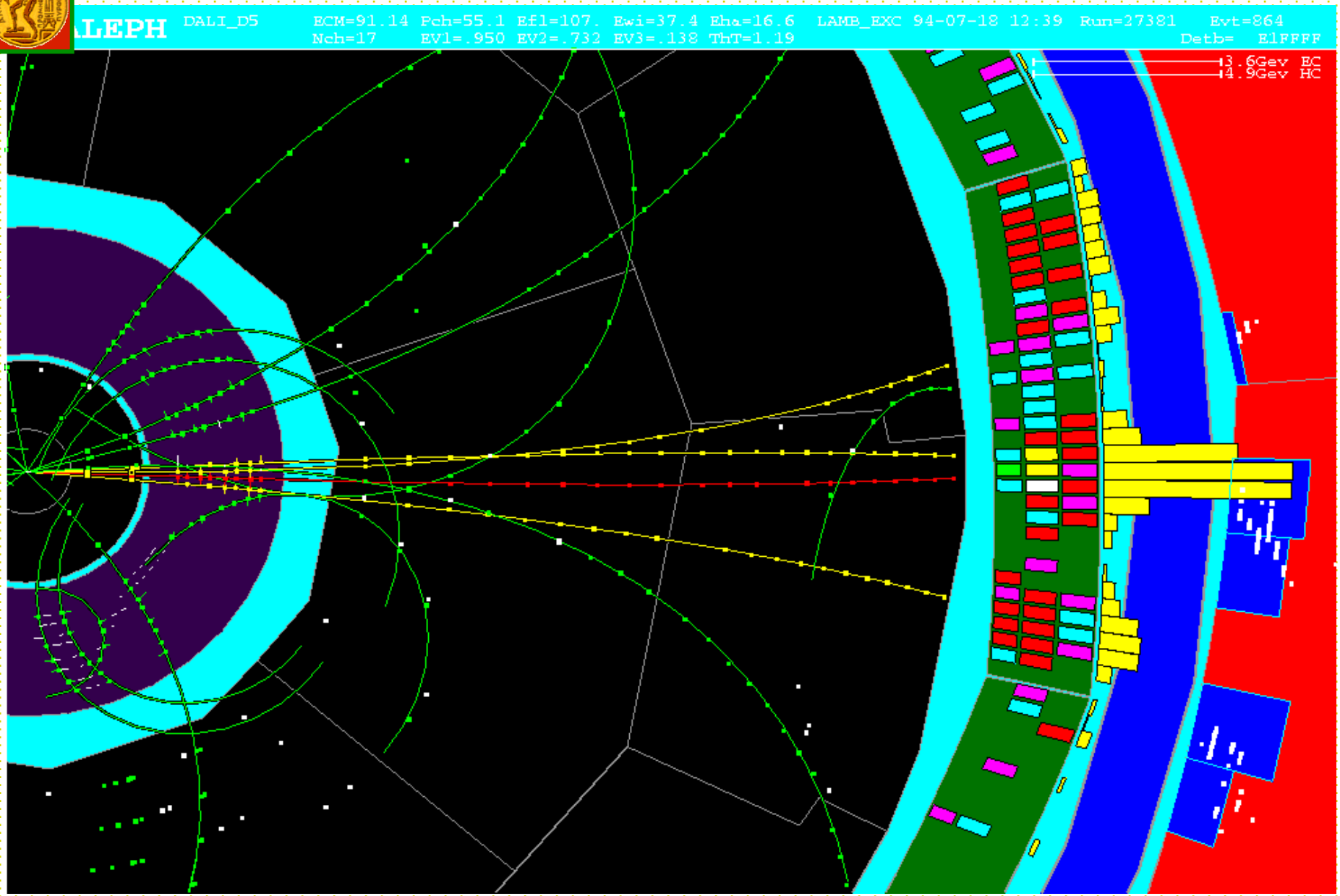
Πυκνό υλικό, π.χ. Μόλυβδος

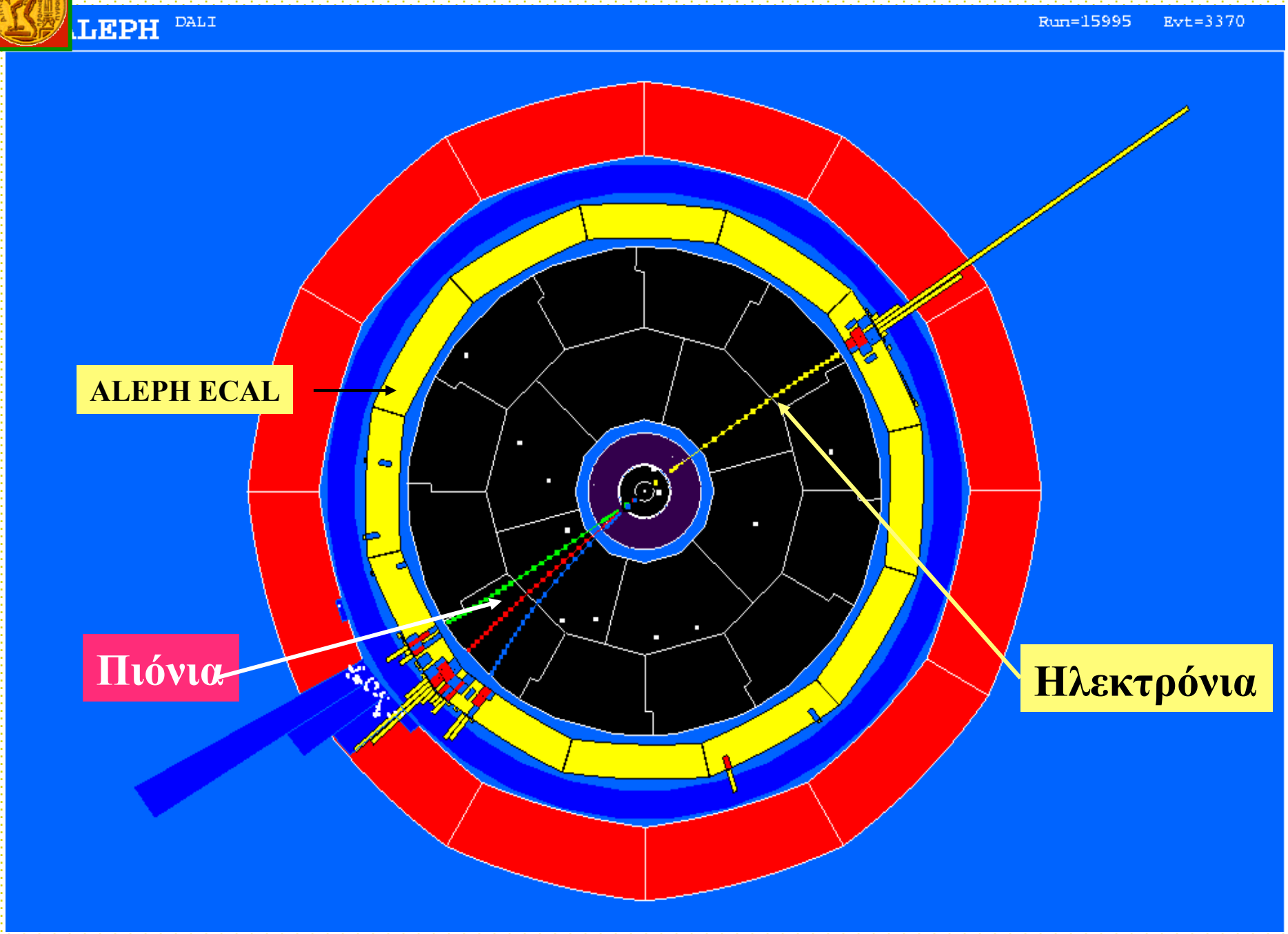
Ανιχνευτές, όπως θάλαμοι αερίου, ή σπινθηριστές

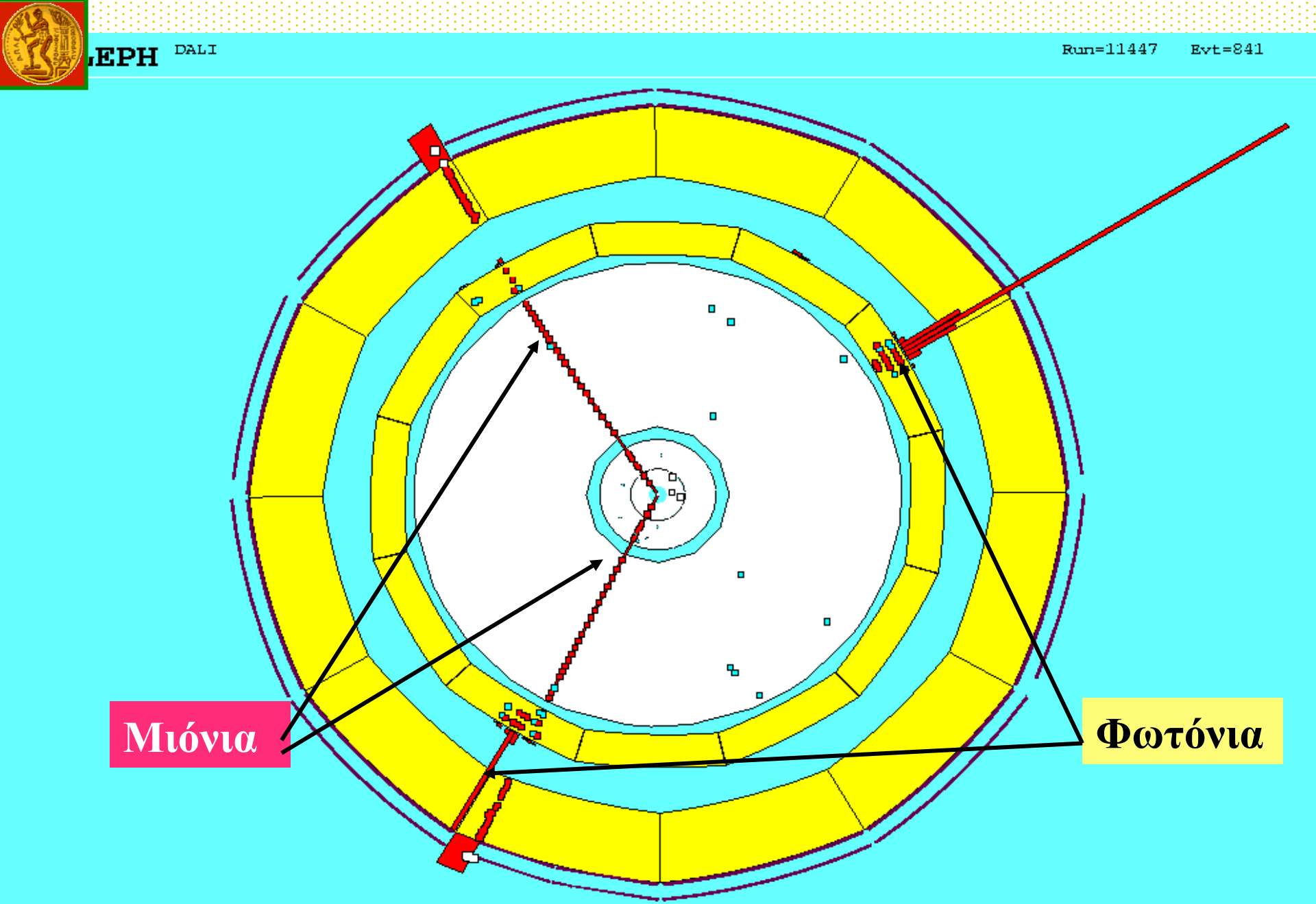
Θερμιδόμετρα Δειγματισμού





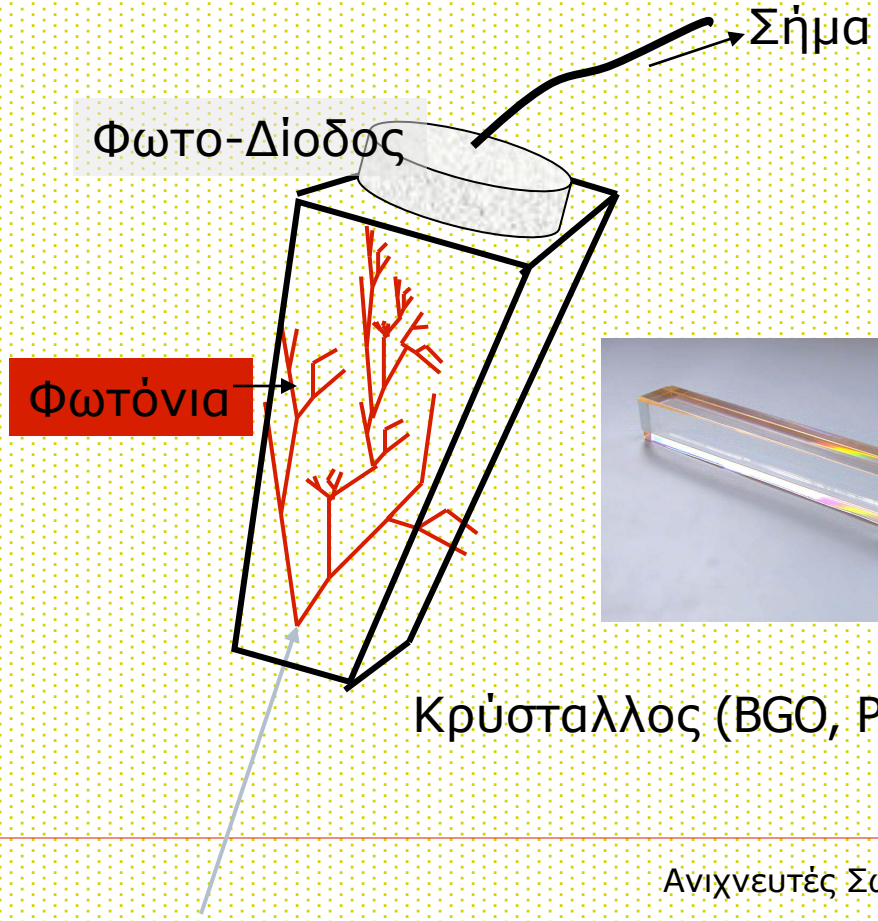

LEPH
DALI_D5
ECM=91.14 Pch=55.1 Ef1=107. Ewi=37.4 Eha=16.6 LAMB_EXC 94-07-18 12:39 Run=27381 Evt=864
Nch=17 EV1=.950 EV2=.732 EV3=.138 ThT=1.19
Detb= E1FFFF
3.6Gev EC
4.9Gev HC

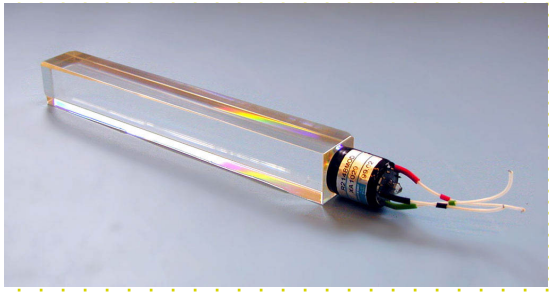

LEPH
DALI
Run=15995
Evt=3370
ALEPH ECAL
Πιόνια
Ηλεκτρόνια


LEPH
DALI
Run=11447
Evt=841
Μιόνια
Φωτόνια

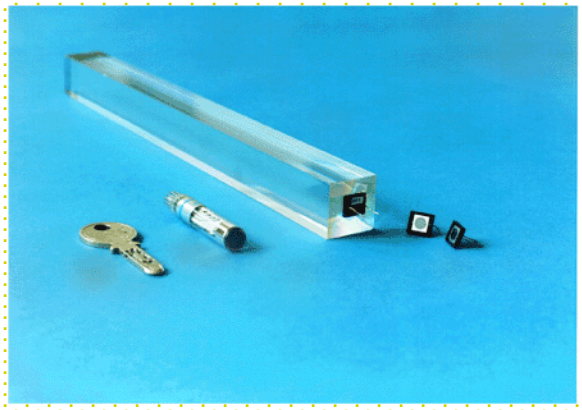
Πώς μετράμε τα δευτερογενή σωματίδια?

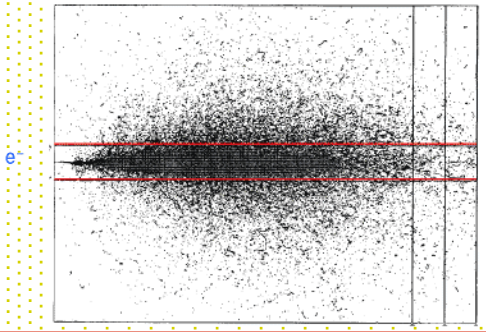
- 2. Με **ομογενή θερμιδόμετρα**, **όπως τα θερμιδόμετρα κρυστάλλων**:





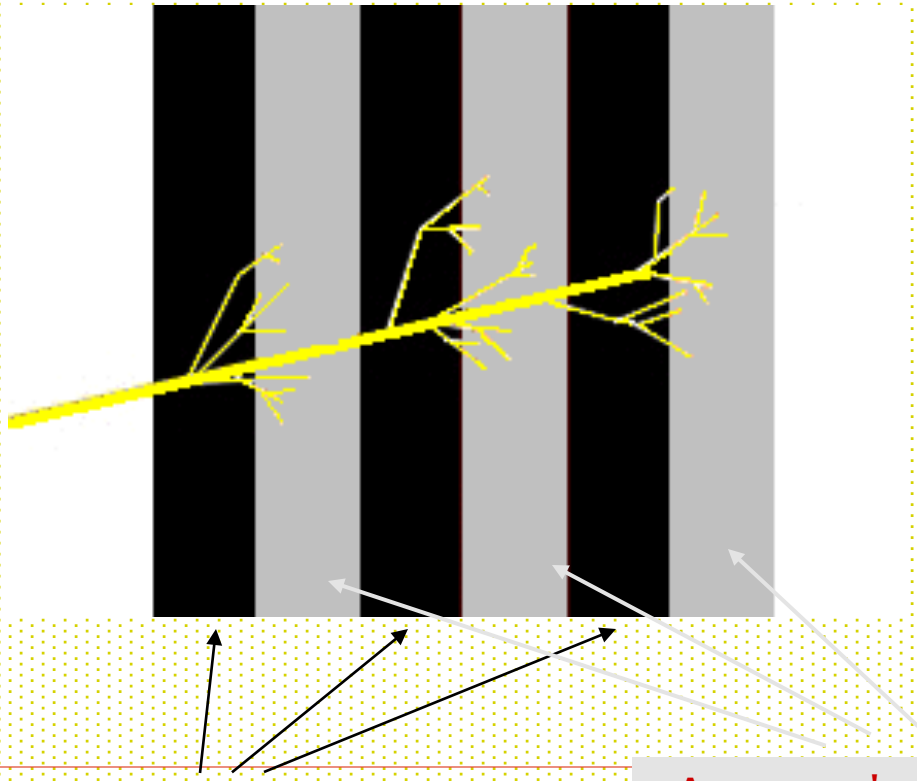
Κρύσταλλος (BGO, $PbWO_4$,...)





Αδρονικά Θερμιδόμετρα (Α-Θ)

- Τα Αδρονικά σωματίδια (πρωτόνια, νετρόνια, πιόνια) μπορούν να διέρχονται από τα ηλεκτρομαγνητικά θερμιδόμετρα (Η-ΜΘ). Μπορούν επίσης να αλληλεπιδρούν μέσω **πυρηνικών αντιδράσεων** !
- Κανόνας: Τοποθετείται ένα θερμ. δειγματισμού μετά το Η-ΜΘ



Δομή Sandwich !!!

Το συνολικό ποσό σημάτων είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ενέργειας

Ίδια απώλεια ενέργειας με εκείνη της πυρηνικής διέγερσης!

Αλλά χρειάζεται να βαθμονομηθεί με δέσμες γνωστής ενέργειας!

Πυκνό υλικό, π.χ. Σίδηρος, Ουράνιο

Ανιχνευτές , όπως Ανιχν. θάλαμοι αερίου, ή Σπινθηριστές

Ταυτοποίηση Σωματιδίων

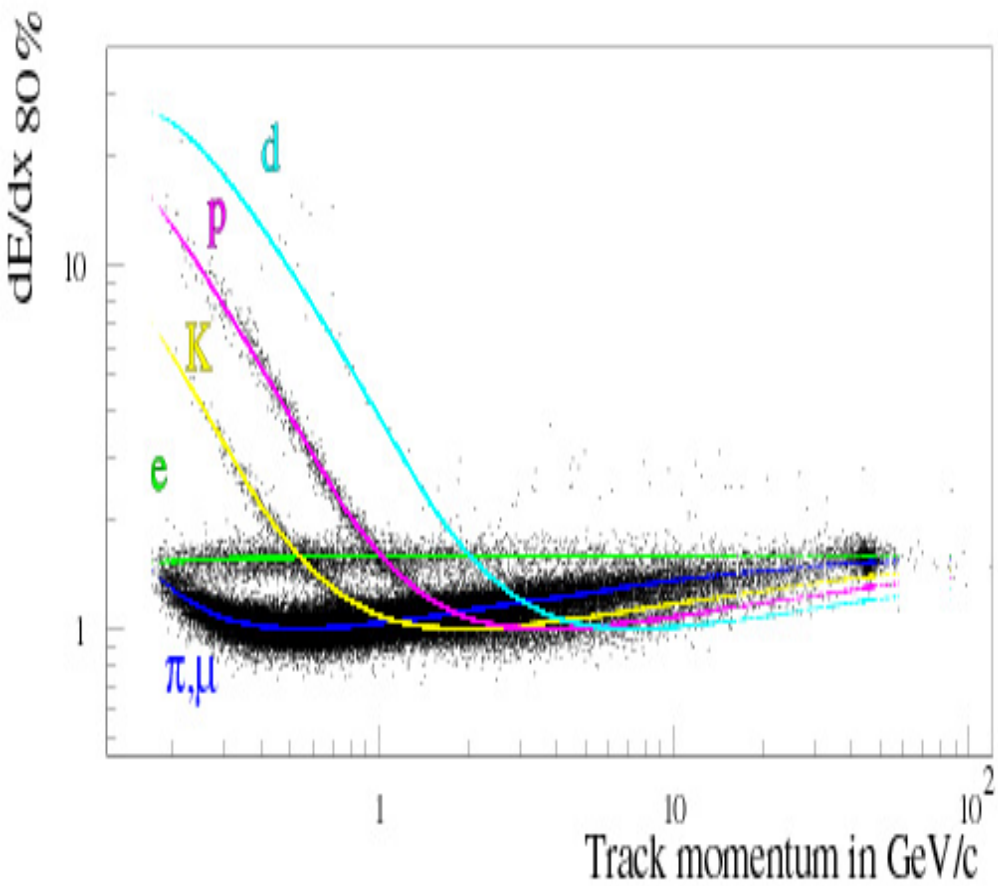
- Βασικές Αρχές:
  - μέσω διαφορετικών αλληλεπιδράσεων με την ύλη
  - με την μέτρηση της μάζας από τα προϊόντα διάσπασης
  - με την μέτρηση της ταχύτητας και **ανεξάρτητα (!)** της ορμής
  - Μετρήσεις **που σχετίζονται με την ταχήτητα**:
    - Μέση απώλεια ενέργειας
    - Ακτινοβολία Cherenkov

Μέση Απώλεια Ενέργειας

- Τα σωματίδια που διέρχονται από ένα αέριο χάνουν ενέργεια, π.χ. **μέσω ιοντισμού**

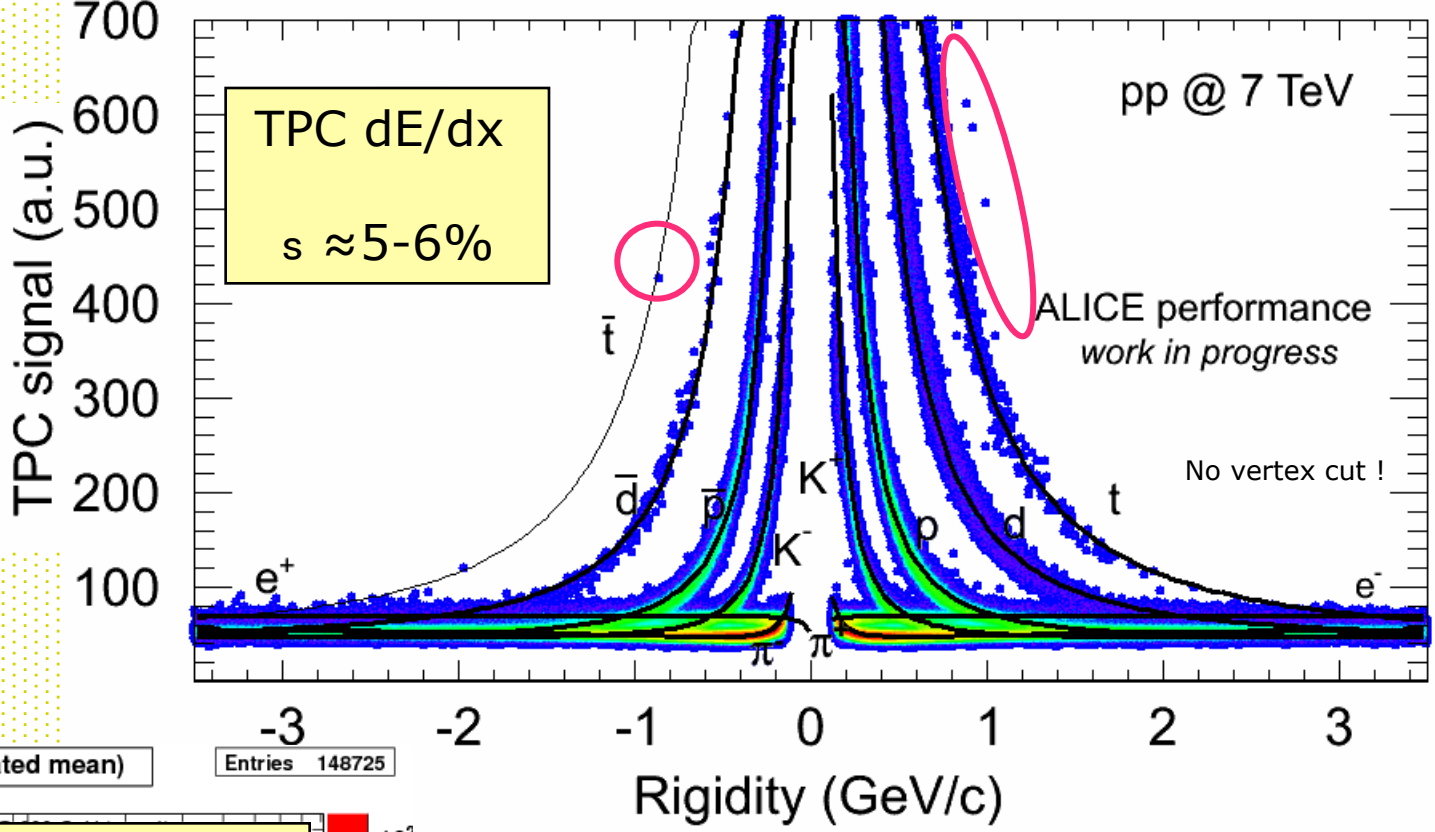
$E_{απώλ.}$ / Μήκος Διαδρομής ~ Ταχύτητα Σωμ. ~ v/c)

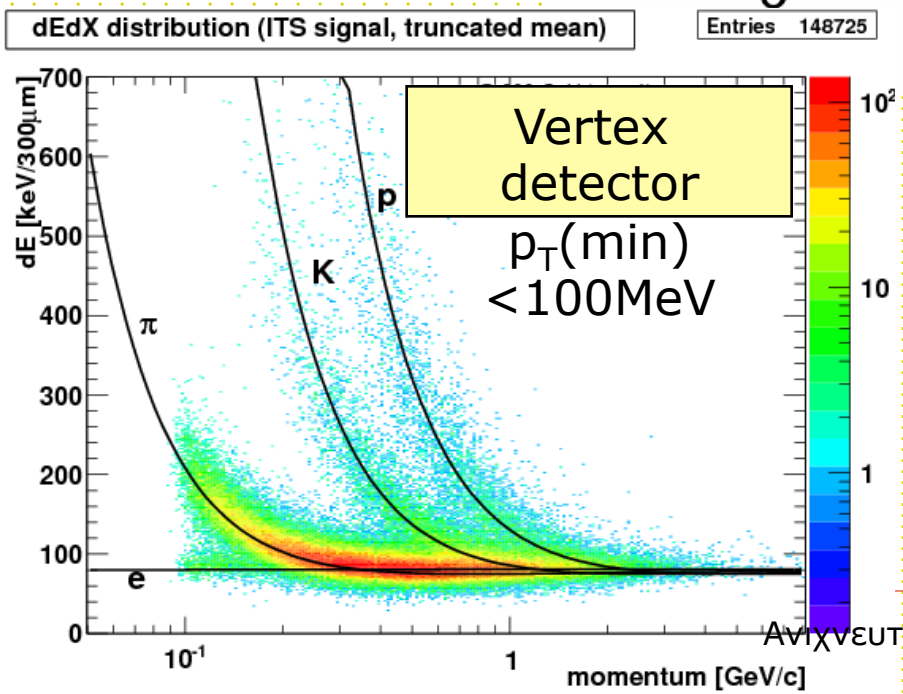
E_{lost} ~ ποσό ιοντισμού ~ μέγεθος σημάτων στα ανοδικά σύρματα

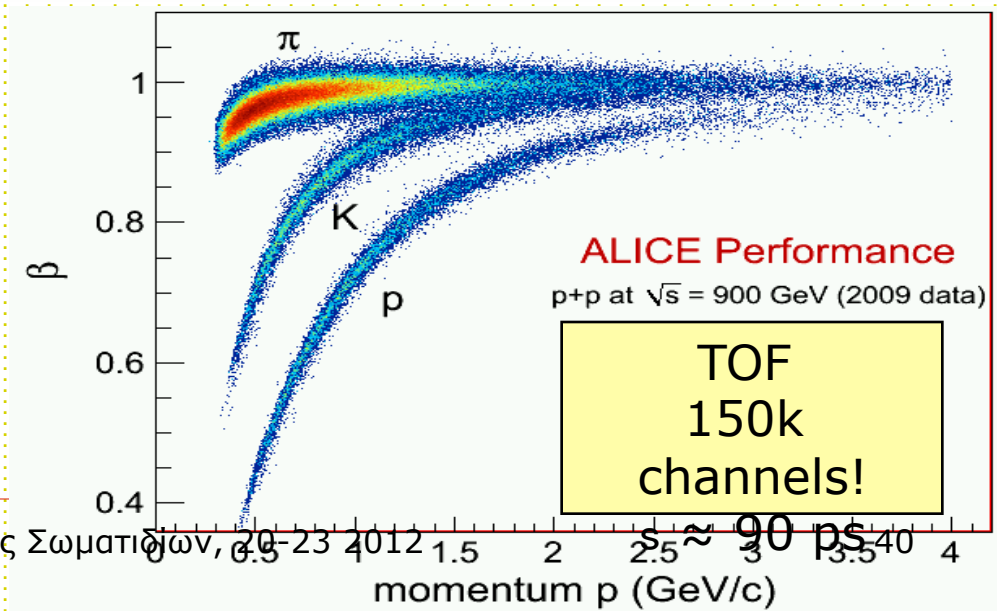


Η σχεδίαση ως προς ταχύτητα (**v**) και **όχι** ως προς ορμή (**p**) θα έδινε ΟΛΕΣ τις ζώνες πάνω στη ίδια θέση!

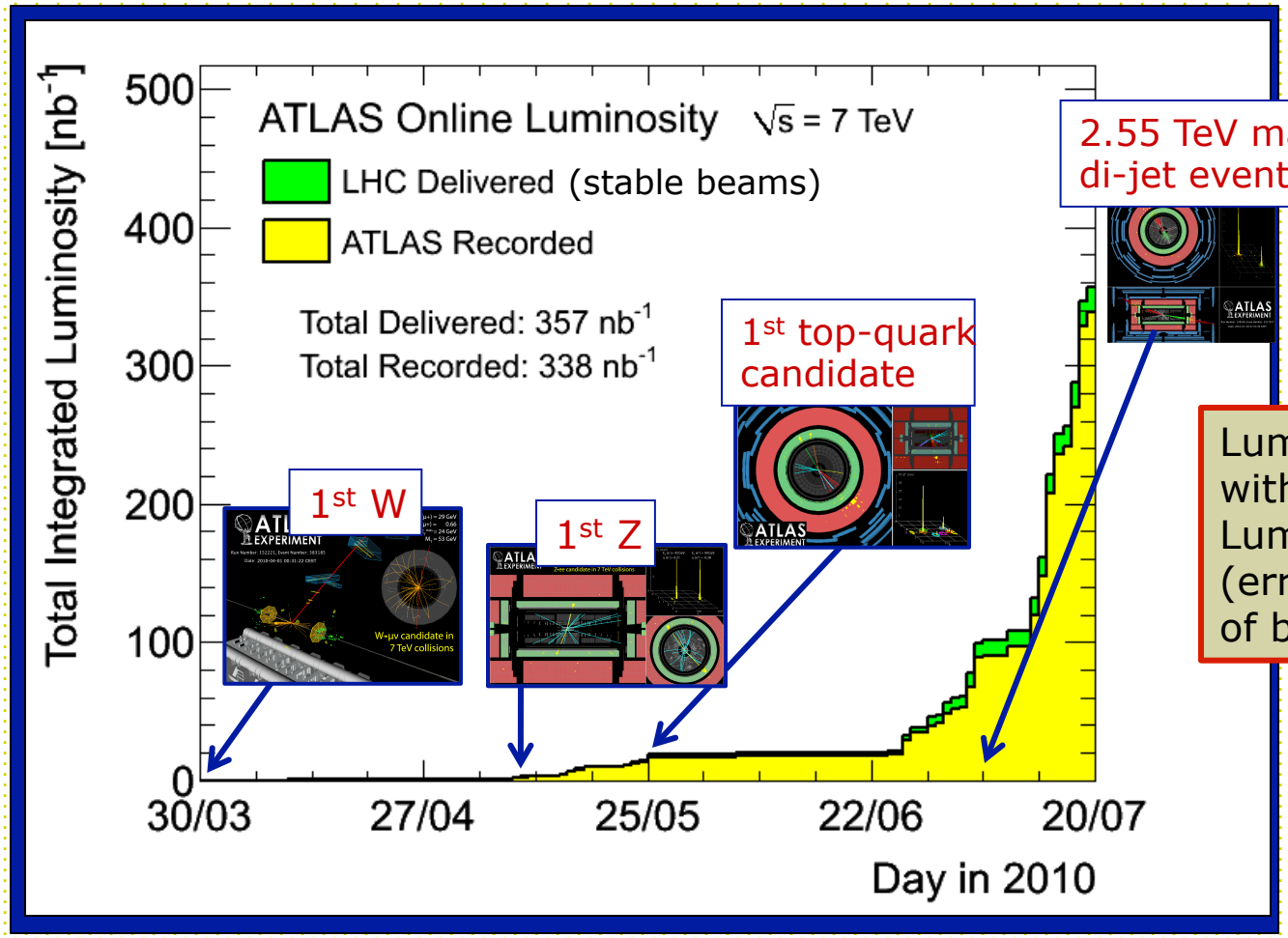
ALICE: PID detectors







Integrated luminosity vs time
(from first √s =7 TeV collisions on 30 March to beginning of ICHEP on 22 July 2010)



Luminosity detectors calibrated with van der Meer scans. Luminosity known today to 11% (error dominated by knowledge of beam currents)

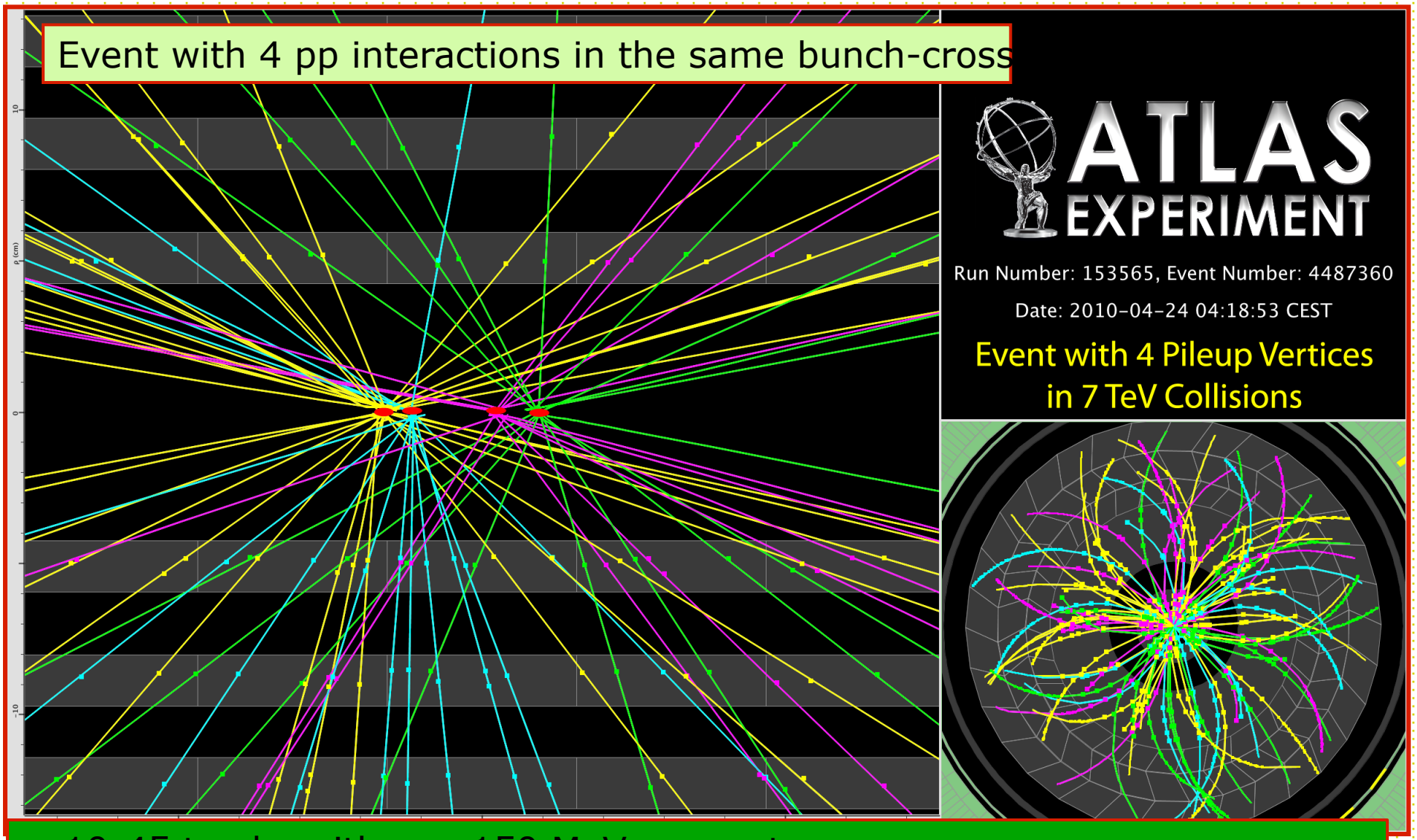
Peak luminosity in ATLAS $L \sim 1.6 \times 10^{30}\ cm^{-2}\ s^{-1}$

Overall data taking efficiency (with full detector on): 9

Results presented here based in many cases on whole data sample recorded until the beginning of ICHEP

Max peak luminosity: $L \sim 1.6 \times 10^{30}\ cm^{-2}s^{-1}$
→ average number of pp interactions per bunch-crossing: up to 1.3
→ "pile-up" (~40% of the events have > 1 pp interaction per crossing)

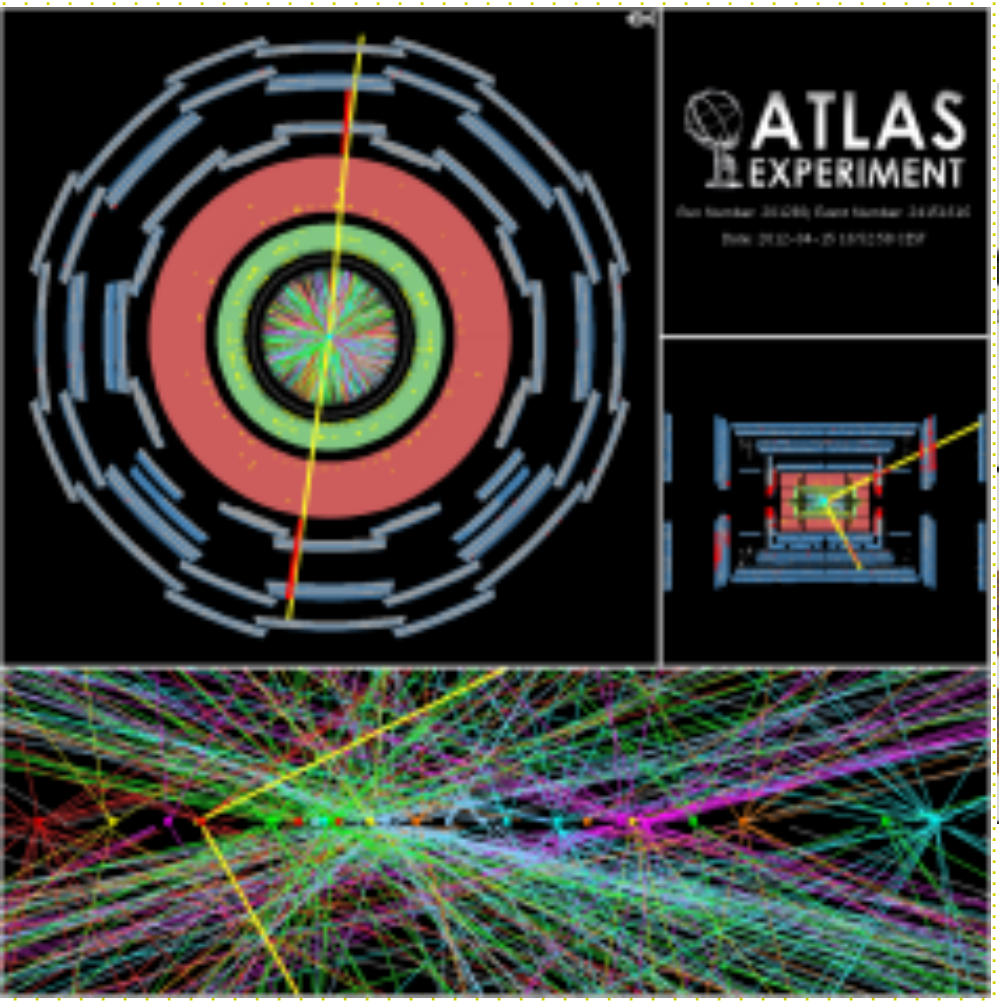
Event with 4 pp interactions in the same bunch-cross



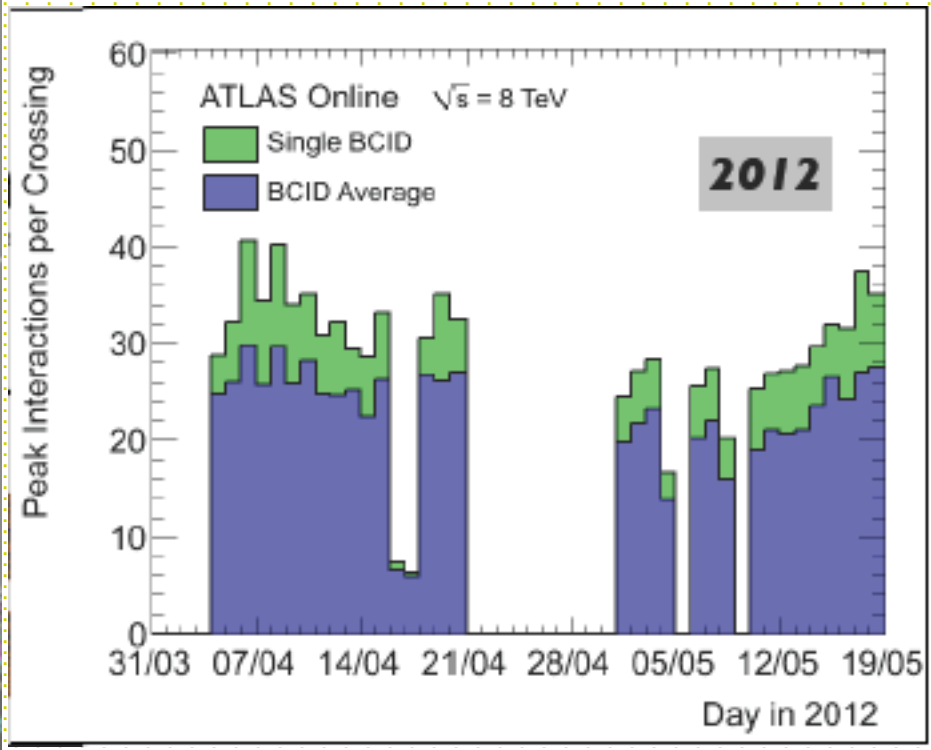
~ 10-45 tracks with p_T >150 MeV per vertex
4 ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΑ ΣΗΜΕΙΑ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ (vertex resolution better than ~200 μm)

HIGH Pile-up 2012

Z->mm with 25 reconstructed vertices



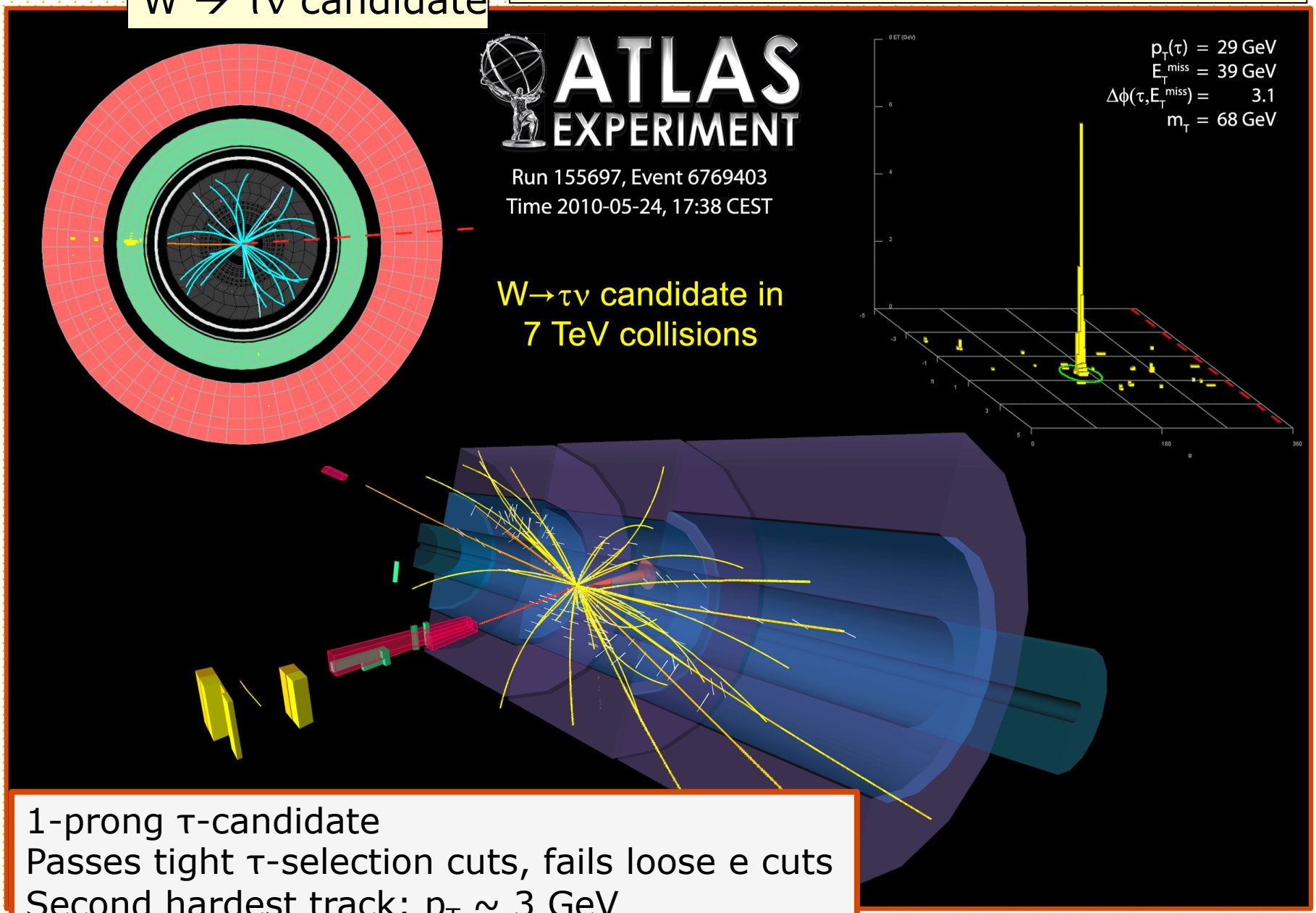
Peak average Interactions/BX



β* = 0.6m

W → τν signal more difficult to observe due to softer spectrum and larger backgrounds (jets, W→ eν, Z→ ττ): signal efficiency < 1%, S/B ~ 7

W → τν candidate



1-prong τ-candidate
Passes tight τ-selection cuts, fails loose e cuts
Second hardest track: p_T ~ 3 GeV

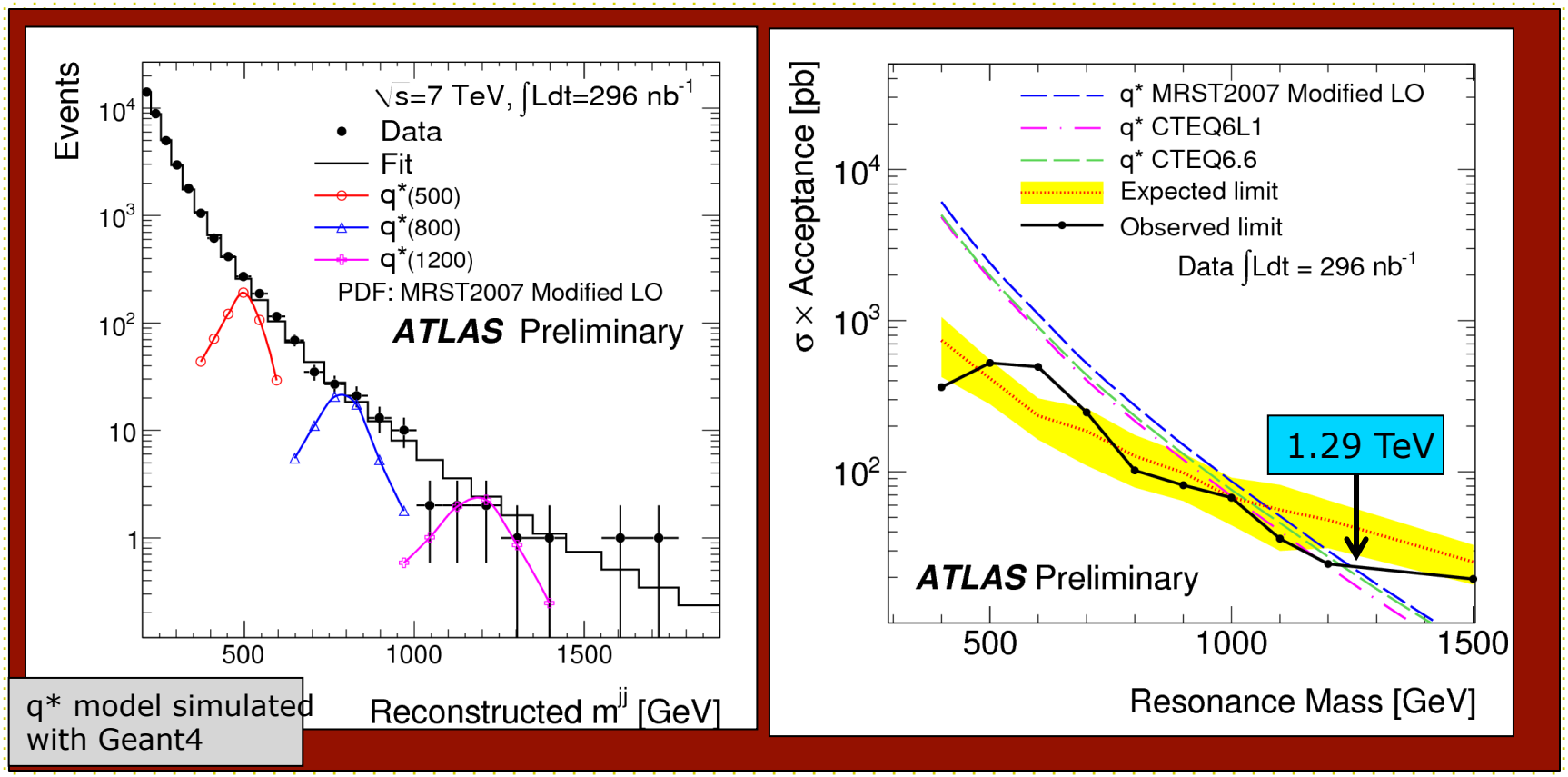
Searches for excited quarks: q*→ jj

Full data sample analysed

Looked for di-jet resonance in the measured M(jj) distribution
→ spectrum compatible with a smooth monotonic function → no bumps

➡ 0.4 < M (q*) < 1.29 TeV excluded at 95%

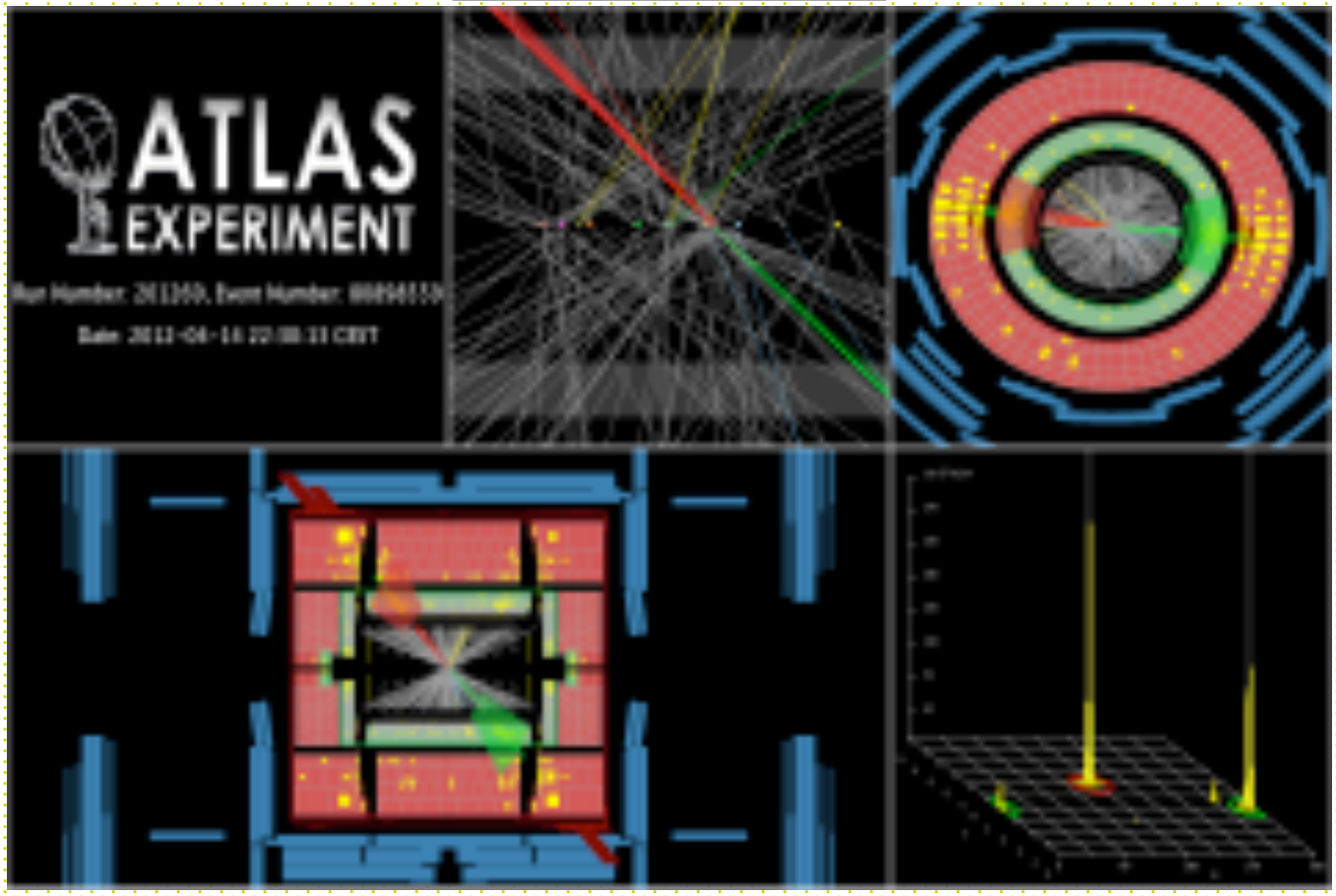
Latest published limit:
CDF: 260 < M (q*) < 870 GeV



- ❑ Experimental systematic uncertainties included: luminosity, JES (dominant), background fit, ..
- ❑ Impact of different PDF sets studied → with CTEQ6L1: 0.4 < M (q*) < 1.18 TeV

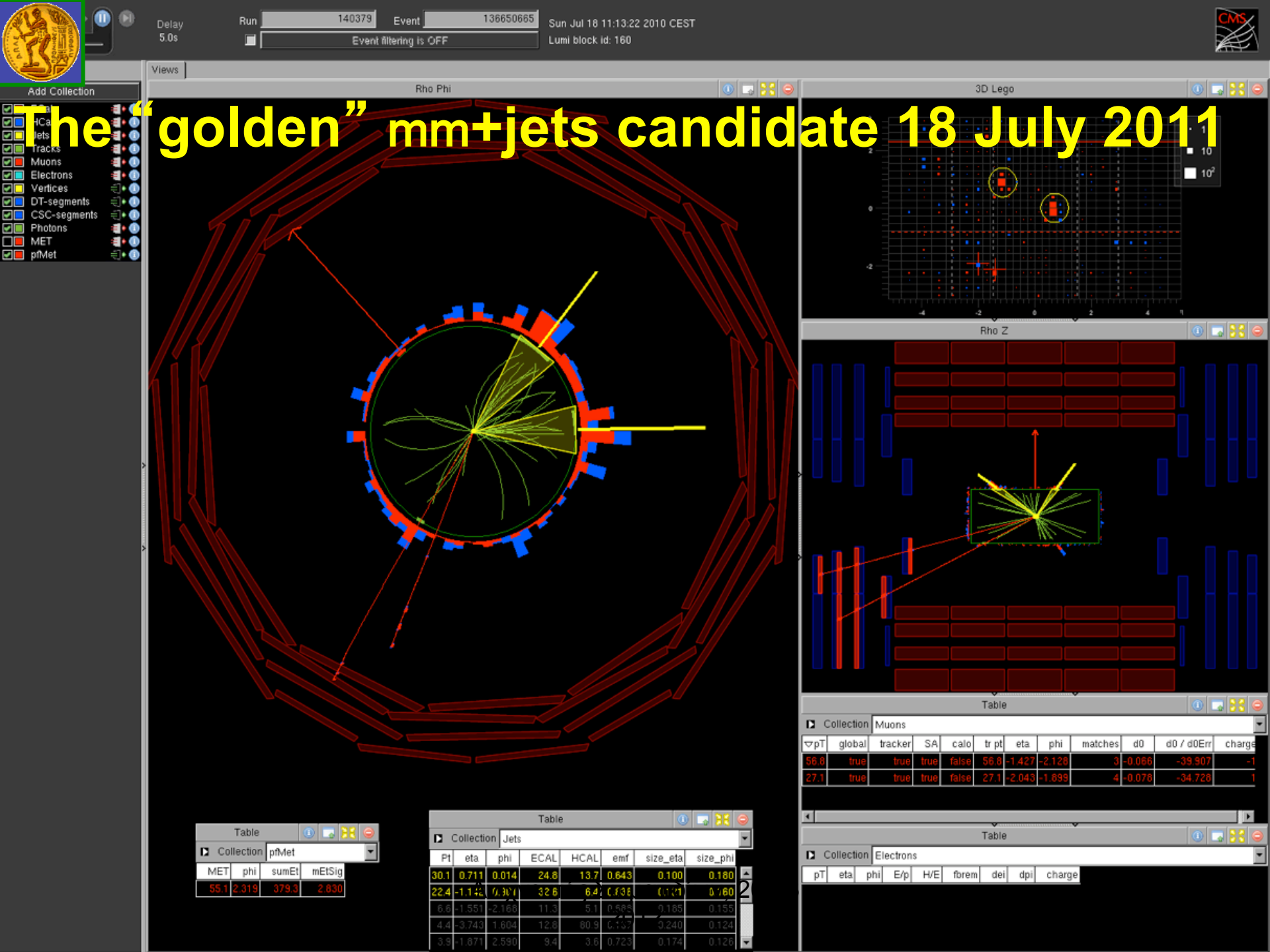
Highest-mass dijet event taken on 14 April 2012

M_{jj} = 4.23 TeV



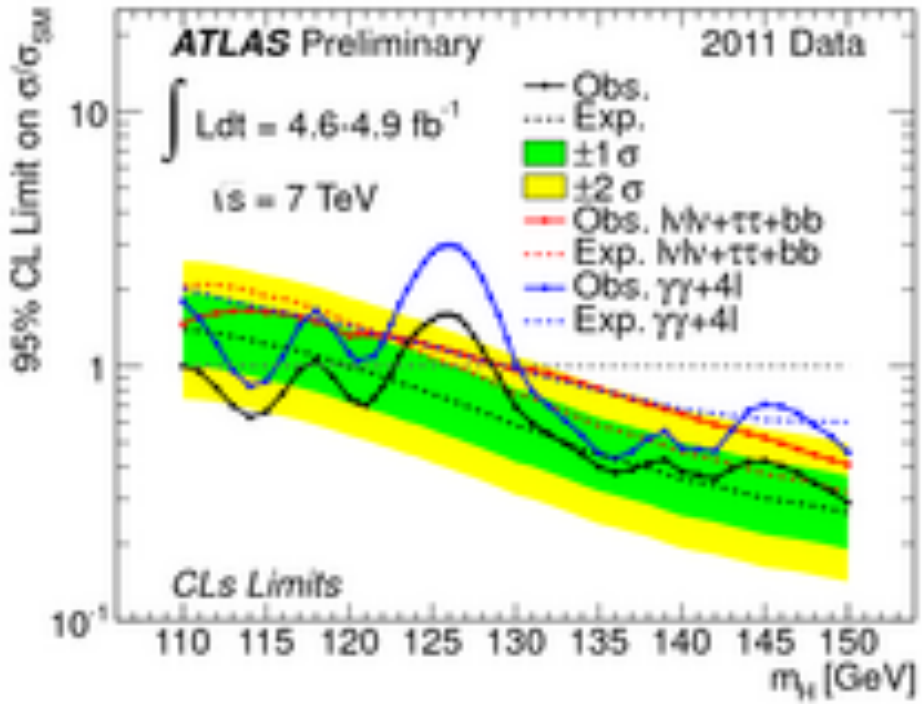
Mjj = 4.23 TeV
Jet 1: p_T = 1.36 TeV, η = -1.02, φ =3.01
Jet 2: p_T = 1.29 TeV, η = 1.06, φ = 0.09
Etmiss = 125 GeV, φ = -0.44
Sum Et= 3.33 TeV
p_T (cut) = 0.5 GeV

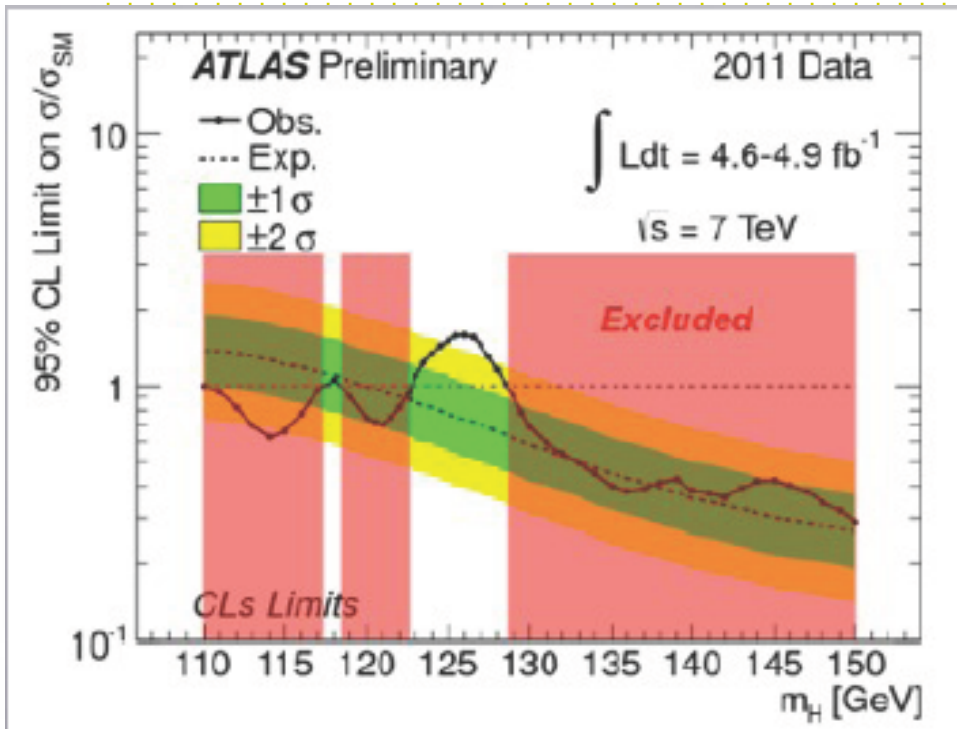
The "golden" mm+jets candidate 18 July 2011



Μποζόνιο HIGGS

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΟΥ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΥΠΑΡΧΕΙ ΤΟ ΜΠΟΖΟΝΙΟ





ΠΙΘΑΝΗ ΜΑΖΑ ΤΟΥ ΜΠΟΖΟΝΙΟΥ HIGGS

H→WW(*)→l+νl−ν

H→bb

H→τ+τ−

H→γγ

H→ZZ(*)→l+l−l+l− ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ

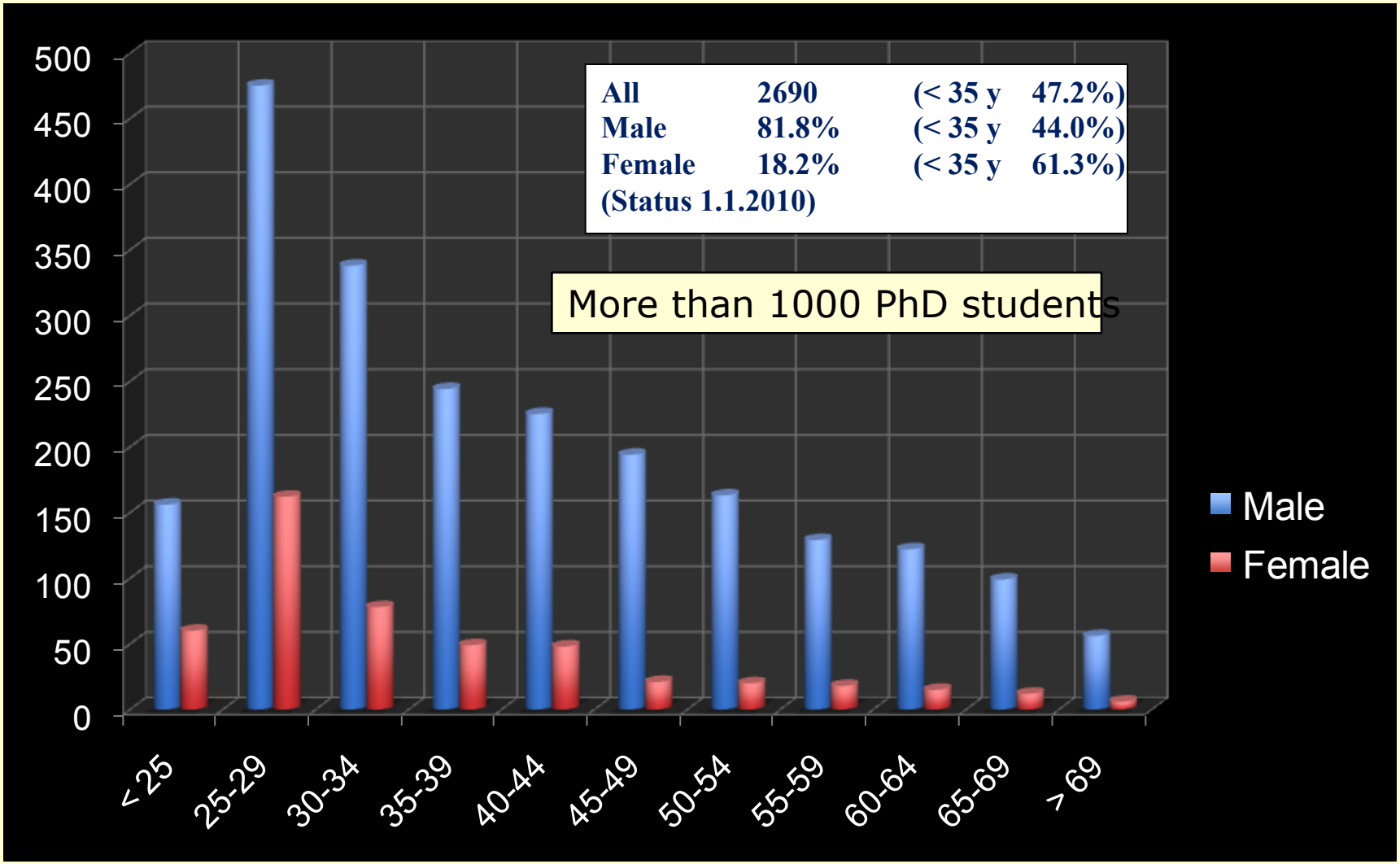
ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ

m_H = (117.5-118.5) GeV/c^2	119.5
(122.5-129.0) GeV/c^2	125.0

Η συνεχής γραμμή είναι το πείραμα και η διακεκομμένη γραμμή είναι τα αναμενόμενα αποτελέσματα

BACKUP SLIDES

Age distribution of the ATLAS population

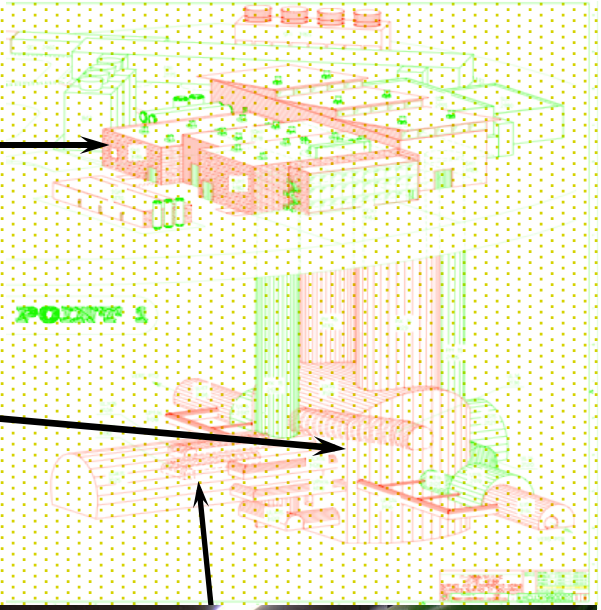


Υποδομή ενός πειράματος

- Τα πειράματα ΔΕΝ είναι μόνο ανιχνευτές
- Χρειάζονται:
  - Σύστημα αυτομάτου ελέγχου των ανιχνευτών
  - Λήψη δεδομένων ΕΚΤΟΣ και παρακολούθηση
  - Ανάλυση των δεδομένων που κατεγράφησαν
  - …

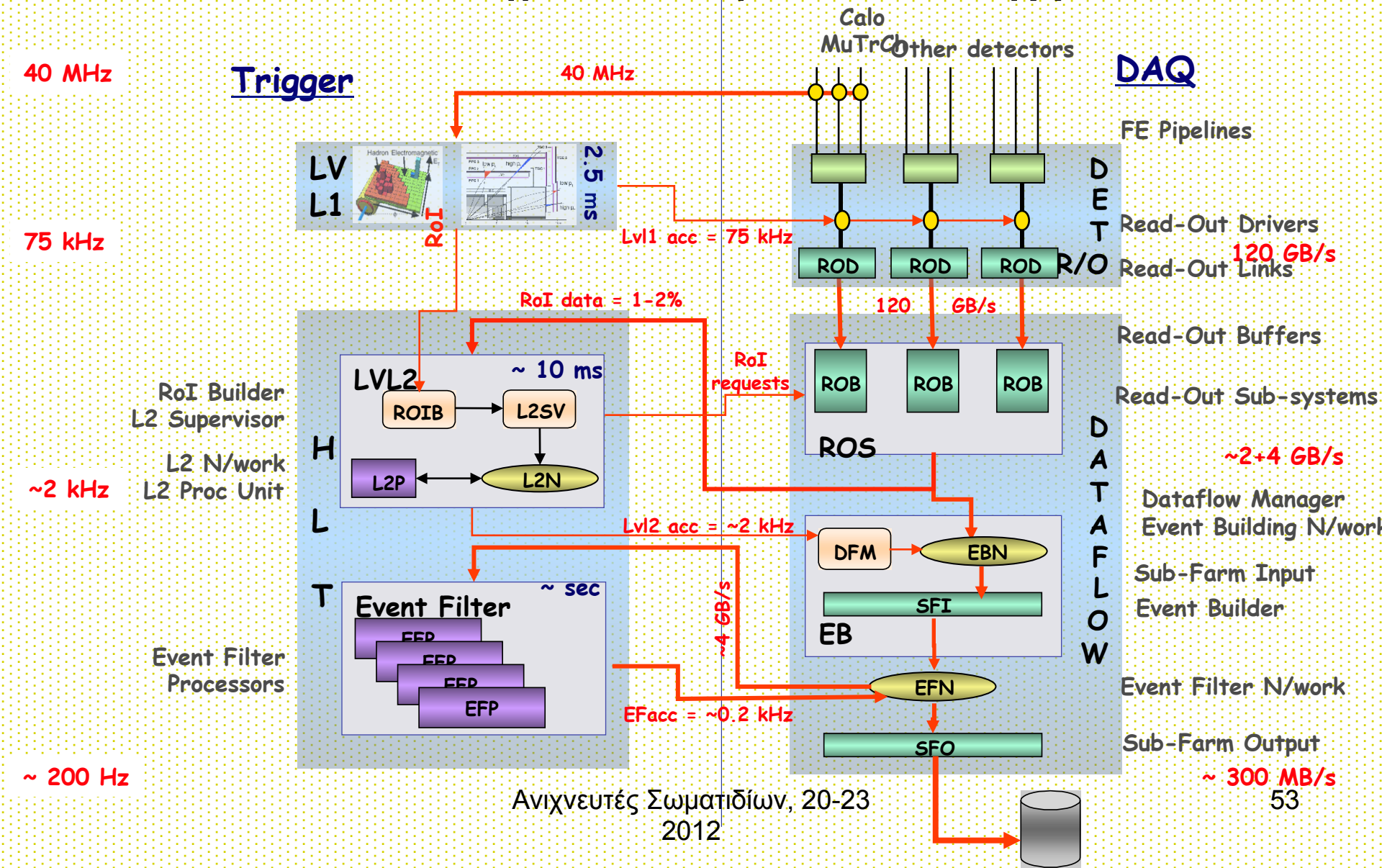
ATLAS: εγκατάσταση υποδομής

Πλήρης κρυογενικός σταθμός



Υπόγεια κοιλότητα υποδοχής του ανιχνευτή 2003

ATLAS: Σκανδαλισμός, Λήψη Δεδομένων και Σύστημα αυτομάτου ελέγχου



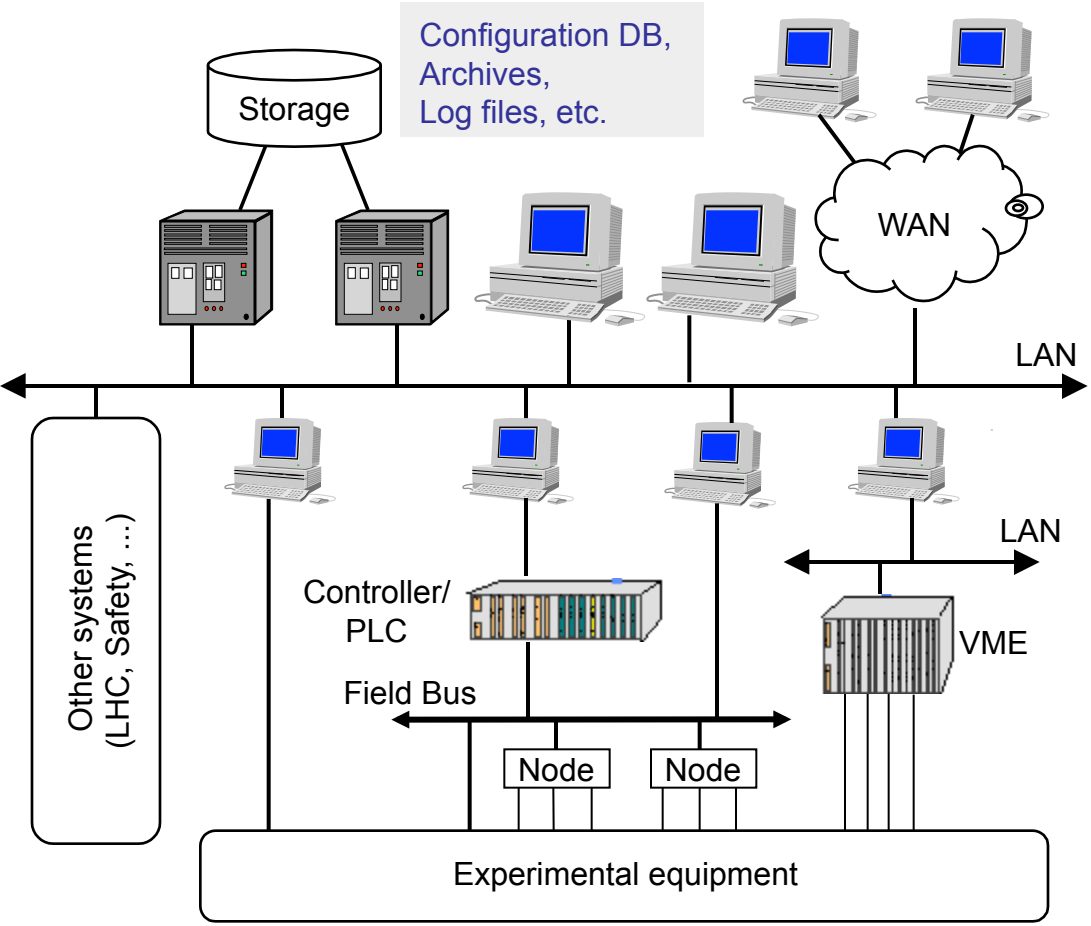
Σκανδαλισμός & Λήψη Δεδομένων

Μεγάλη προσπάθεια τον τελευταίο χρόνο για να λειτουργήσει το σύστημα λήψης δεδομένων χρησιμοποιώντας πρότυπες μονάδες και ομοιοποιητές

Κλίμακα 1:8 του συστήματος λήψης δεδομένων (preseries) εγκατεστημένων στο Point 5, δοκιμάζοντας την τελική λειτουργικότητα και την συνήθη επίδοση

Ανιχνε

Σύστημα Αυτομάτου Ελέγχου @ LHC



Layer Structure

Supervision

Process Management

Field Management

Technologies

Commercial | Custom

FSM

SCADA

PVSS II

OPC | DIM

Communication Protocols

PLC/UNICOS | VME

Field buses & Nodes

Sensors/devices

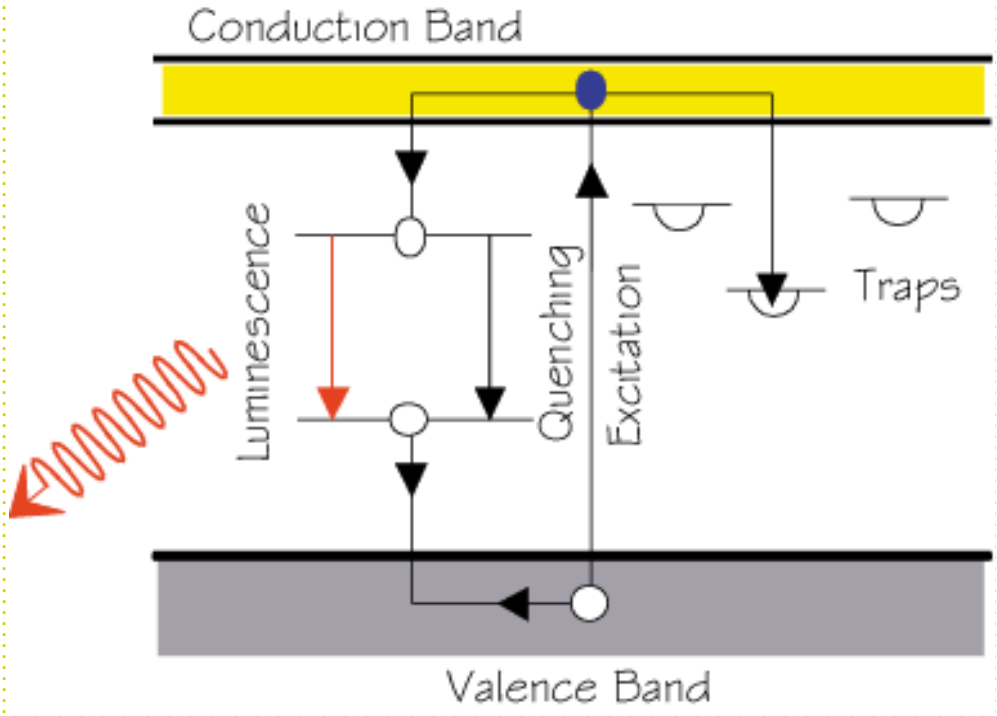
Based on an original idea from LHCb

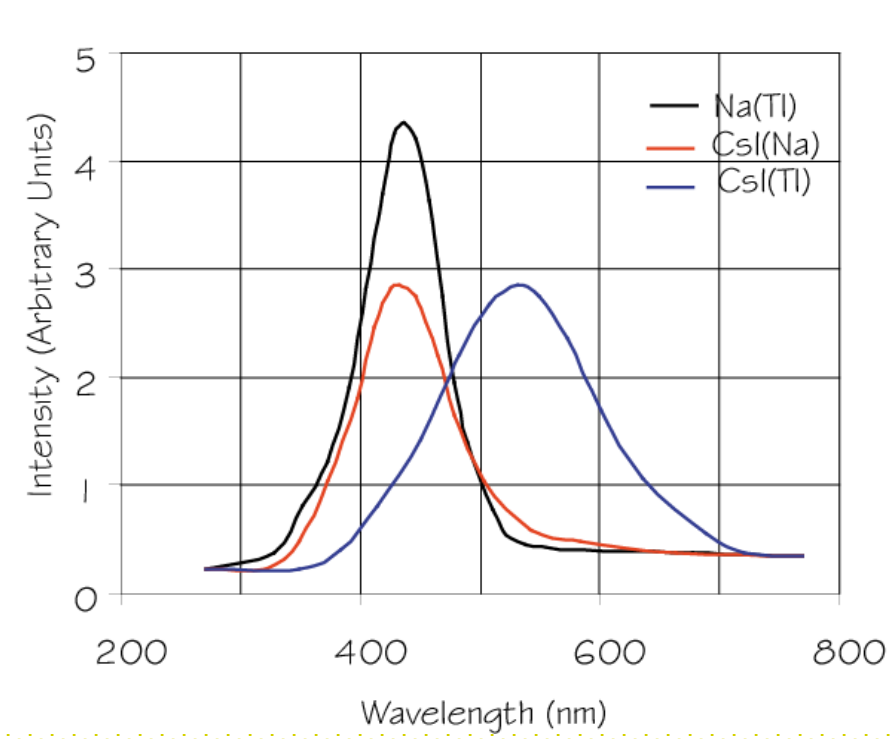
Σύστημα Ασφάλειας Ανιχνευτή

- Κοινό Σύστημα για:
  - Ασφάλεια του ανιχνευτή του πειράματος
  - Ανάπτυξη σε καθιερωμένη τεχνολογία
- Χαρακτηριστικά
  - Ανεξάρτητο σύστημα (**front-end**) ικανό να λειτουργεί από μόνο του για να παρακολουθεί και να εξασφαλίζει τον ανιχνευτή
  - Συνοπτικό σύστημα (**back-end**) για να πληροφορεί άμεσα τους υπεύθυνους ασφάλειας

Ο πιο κοινός ανόργανος σπινθηριστής με ευρύτατη χρήση στην έρευνα και τις εφαρμογές είναι το **Ιωδιούχο Νάτριο** ενεργοποιημένο με ίχνη Θαλίου [NaI(Tl)].

Οι Ενεργειακές ζώνες με προσμίξεις σε ενεργοποιημένο κρύσταλλο

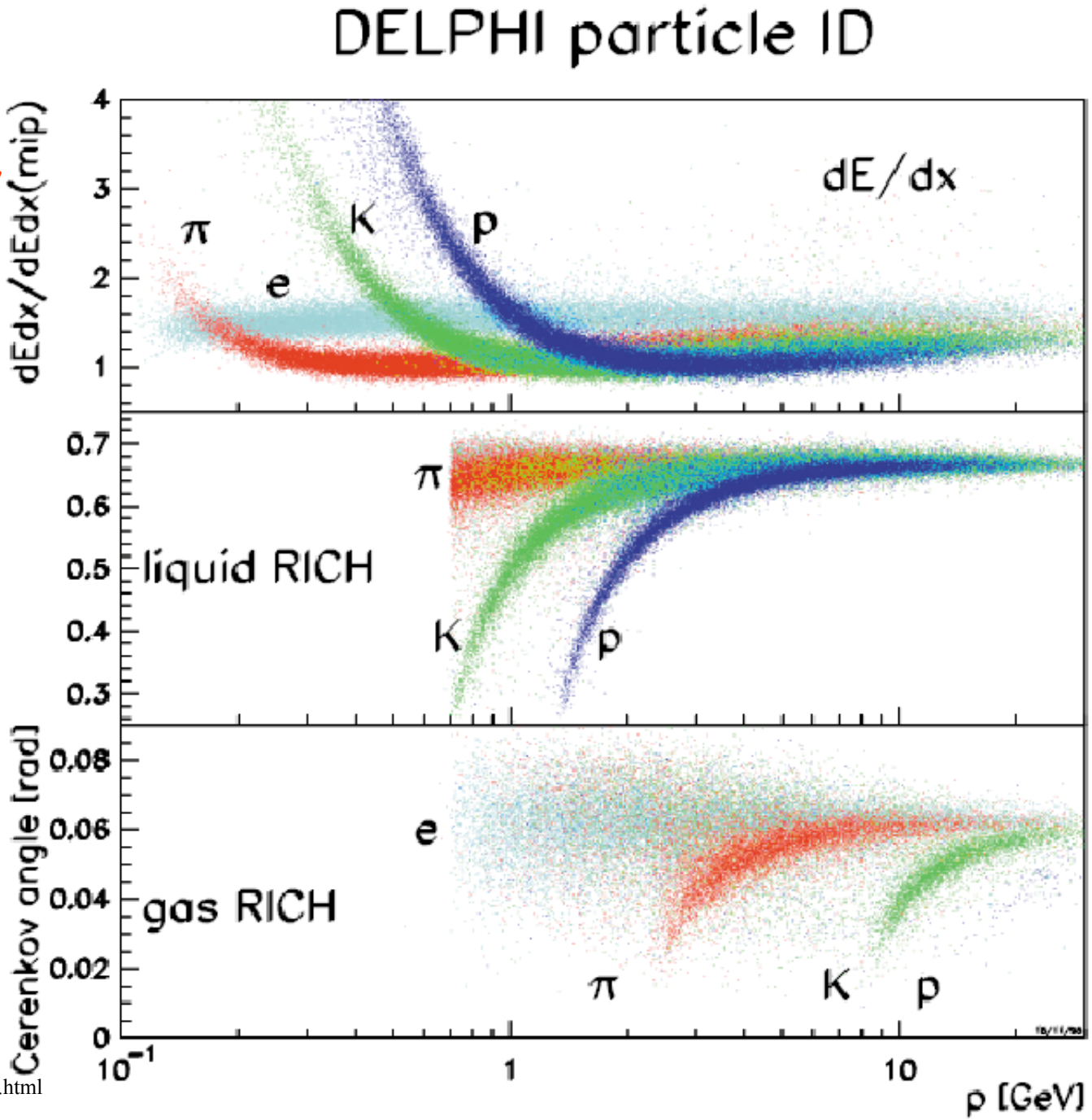




Ταυτοποίηση Σωματιδίων
με
DELPHI
TPC
και
RICHes

Για δεδομένα:

p από L
K από F D^*
p από K^o



http://delphiwww.cern.ch/delfigs/export/pubdet4.html
DELPHI, NIM A: 378(1996)57