ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ (ΦΥΕ)

Ανιχνευτές και Μεθοδολογία ΙΙ

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

Μονάδες και Χρήσιμες Σχέσεις

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Ενέργεια E: μονάδα μέτρησης eV
ορμή p: μονάδα μέτρησης eV/c
μάζα m_0 : μονάδα μέτρησης eV/c^2

$$\beta = \frac{v}{c} \qquad (0 \le \beta < 1) \qquad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad (1 \le \gamma < \infty)$$

$$E = m_0 \gamma c^2 \qquad p = m_0 \gamma \beta c \qquad \beta = \frac{pc}{E}$$

1 eV → πολύ μικρή ποσότητα ενέργειας

$1\ \text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$

$m_{bee} = 1\text{g} = 5.8 \cdot 10^{32}\ \text{eV}/c^2$

$v_{bee} = 1\ \text{m/s} \rightarrow E_{bee} = 10^{-3}\ \text{J} = 6.25 \cdot 10^{15}\ \text{eV}$

$E_{LHC} = 14 \cdot 10^{12}\ \text{eV}$

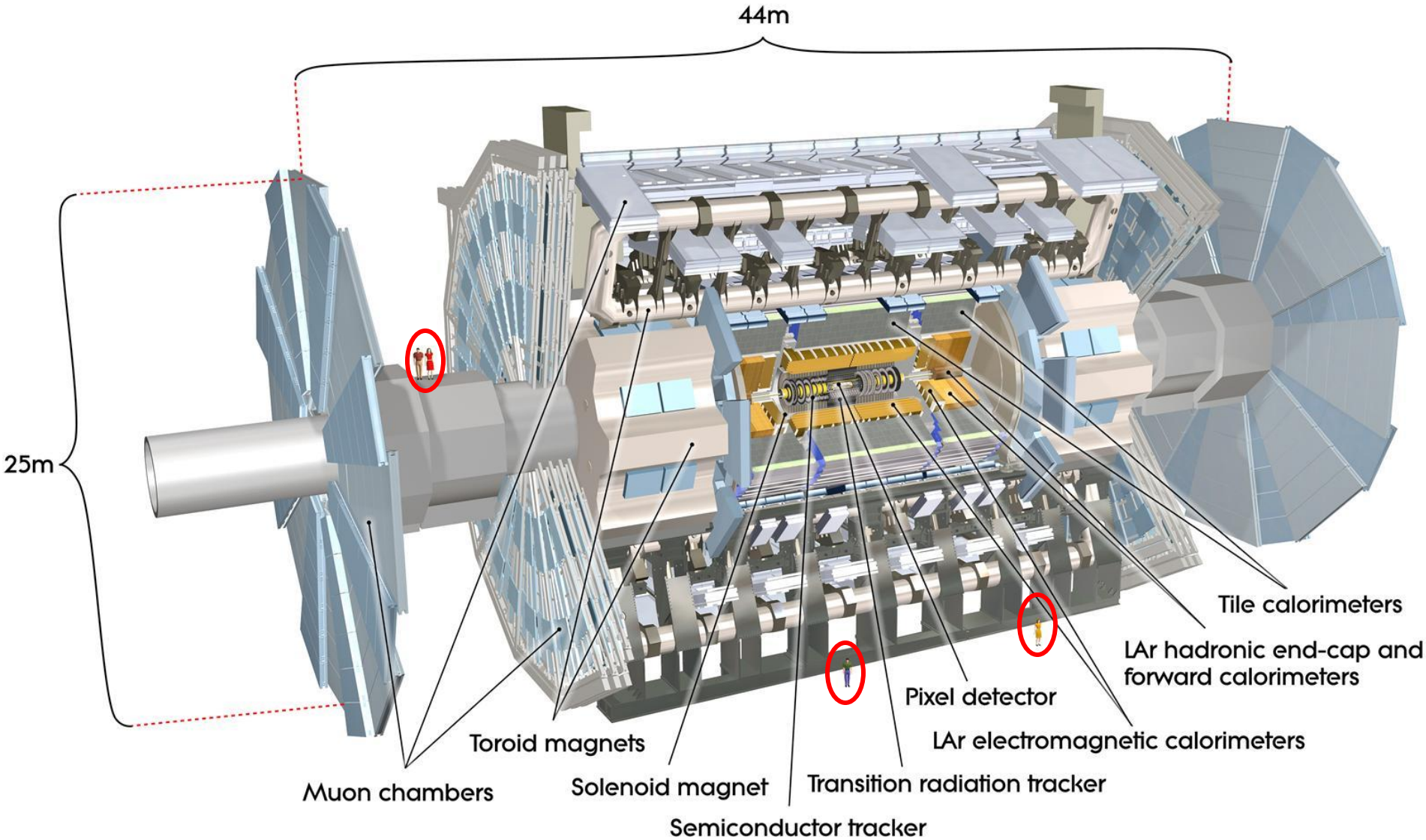
Αλλά το LHC έχει συνολική ενέργεια / δέσμη

$10^{14}\ \text{protons} \times 14 \cdot 10^{12}\ \text{eV} \cong 10^8\ \text{J}$

ή αν προτιμάτε

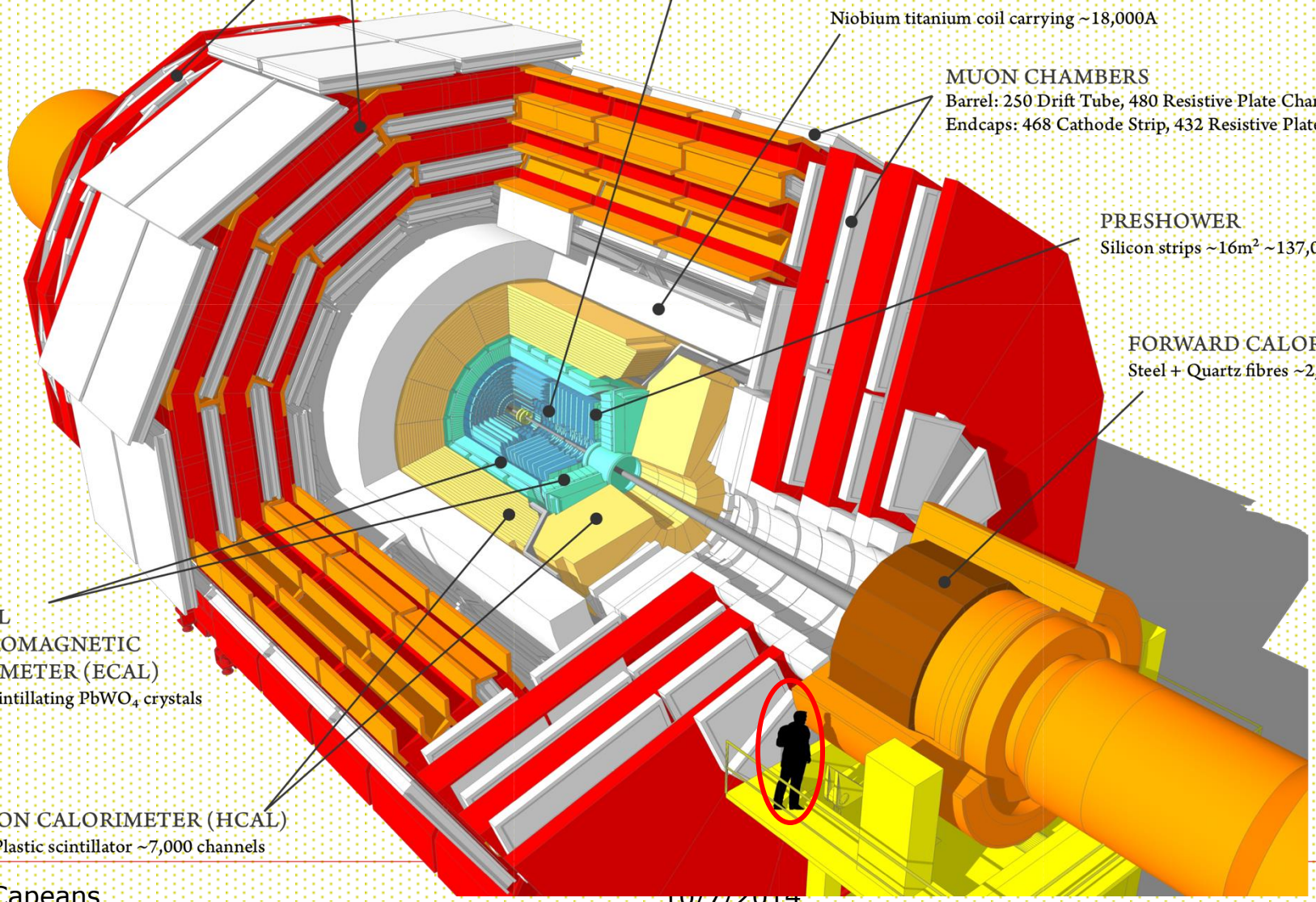
ένα φορτηγό 100 T
που τρέχει με 120 km/h

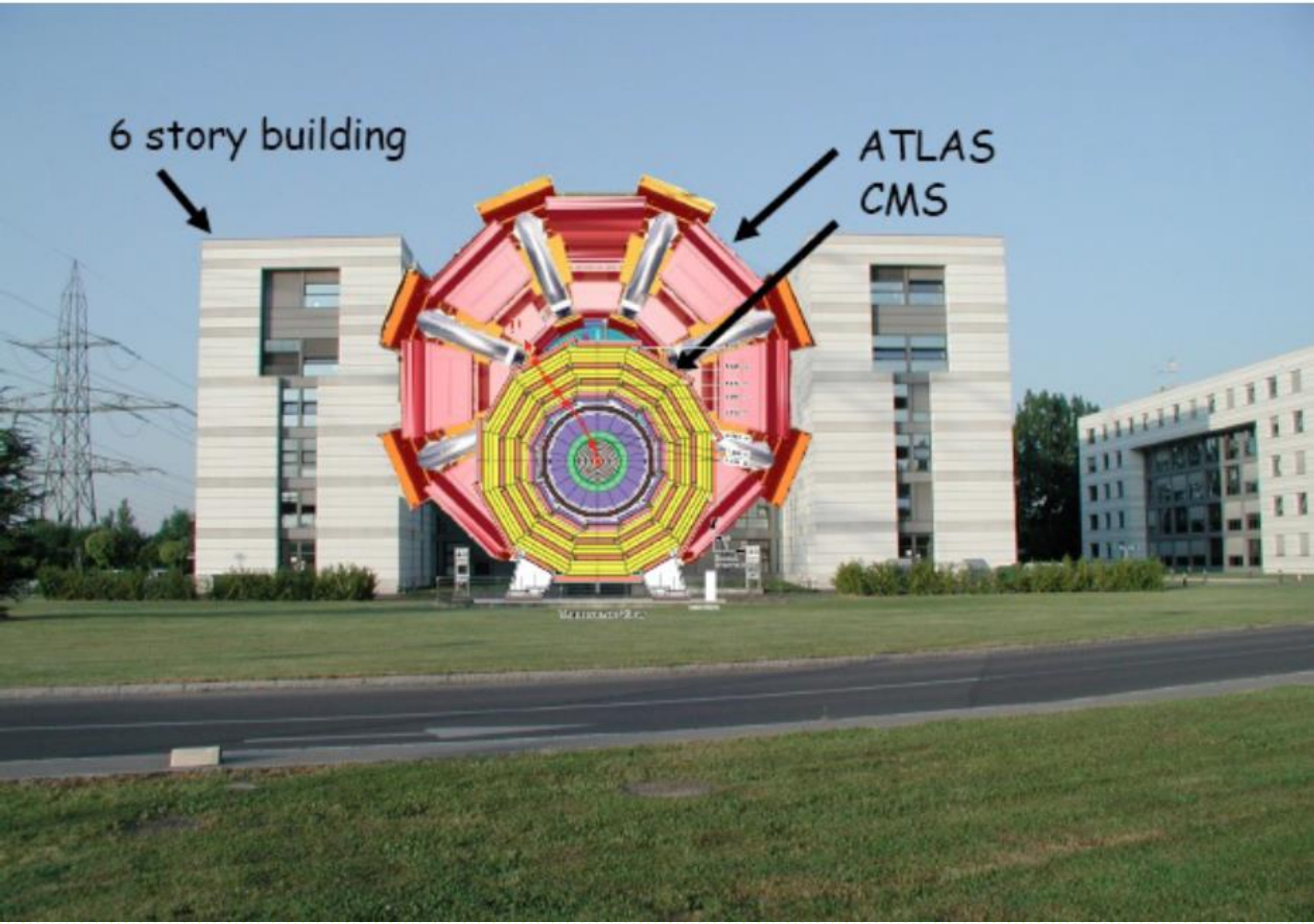
• ATLAS Detector •



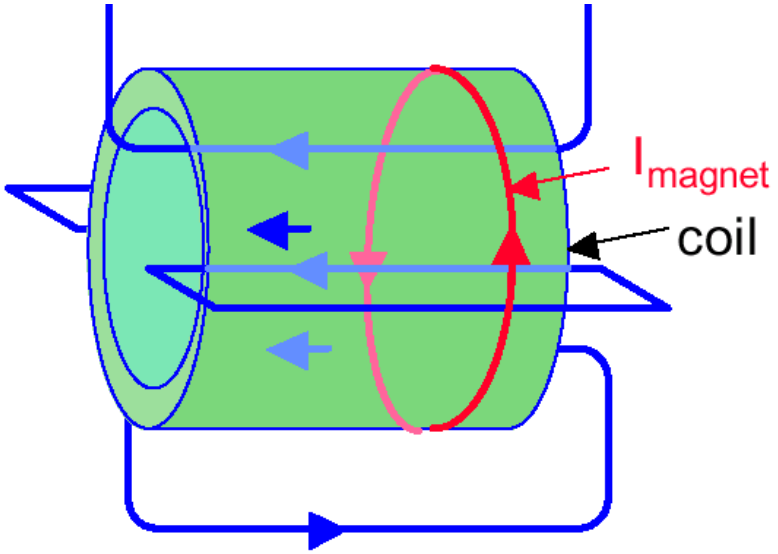
CMS DETECTOR

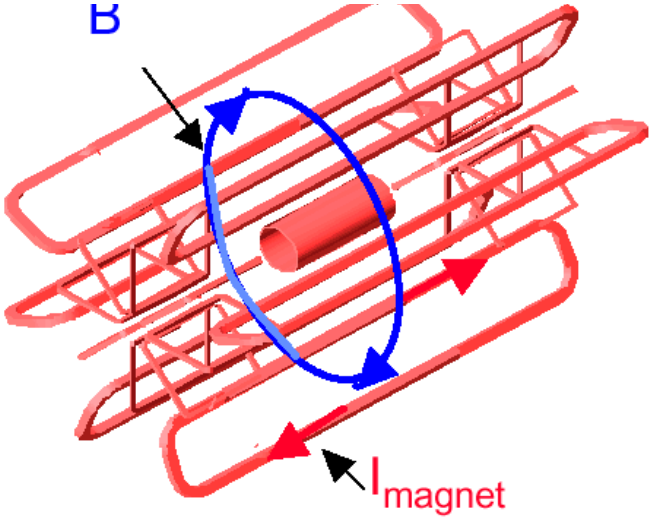
Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T




6 story building
ATLAS
CMS

• Μαγνητικά Πεδία•

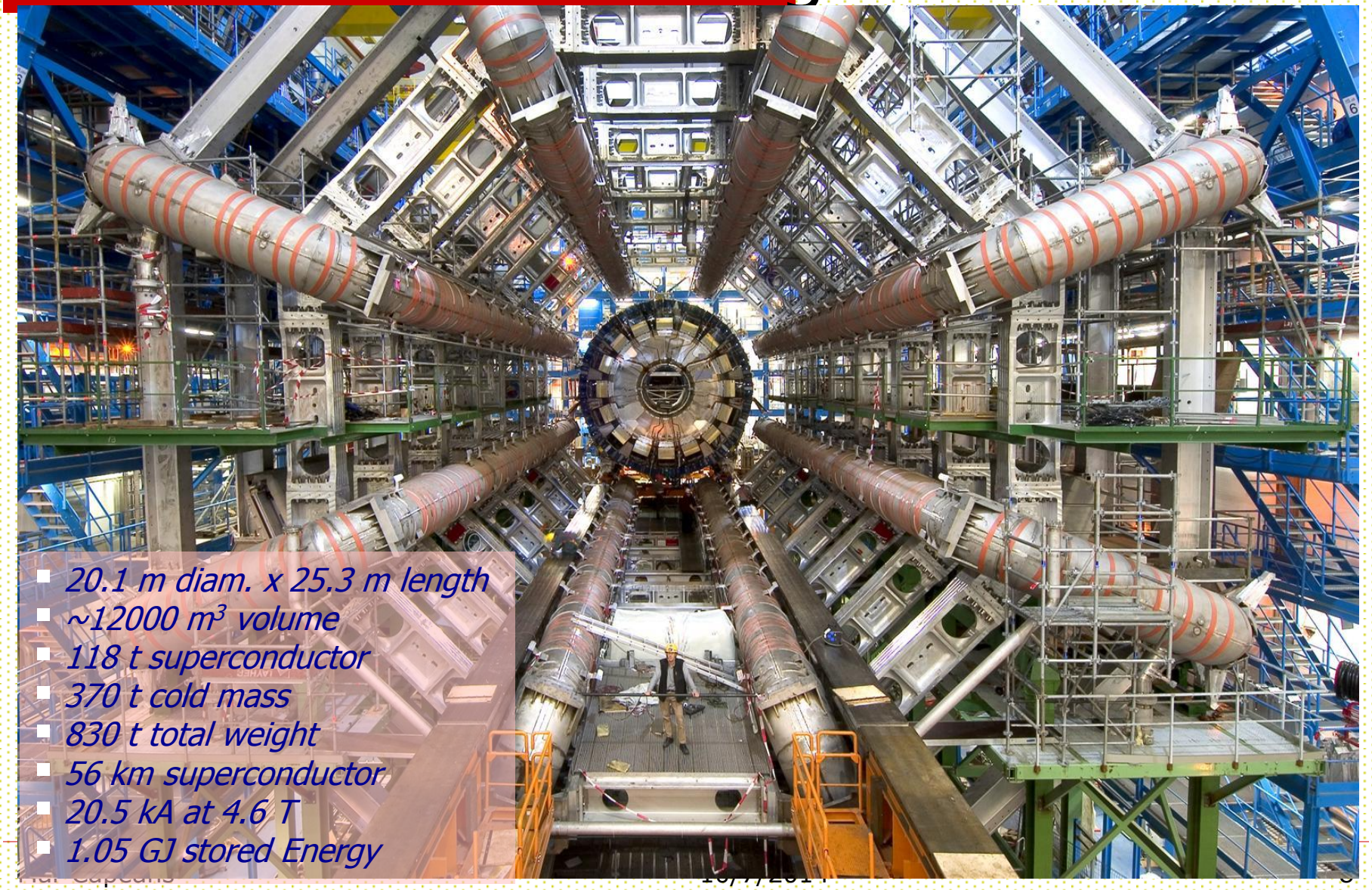




+ Μεγάλο Ομογενές πεδίο μέσα στο πηνίο
- Ασθενές αντίθετο πεδίο στην επιστροφή των μαγνητικών πεδίων
- Περιορισμένο μέγεθος (κόστος)
- Σχετικά μεγάλος προϋπολογισμός για υλικά

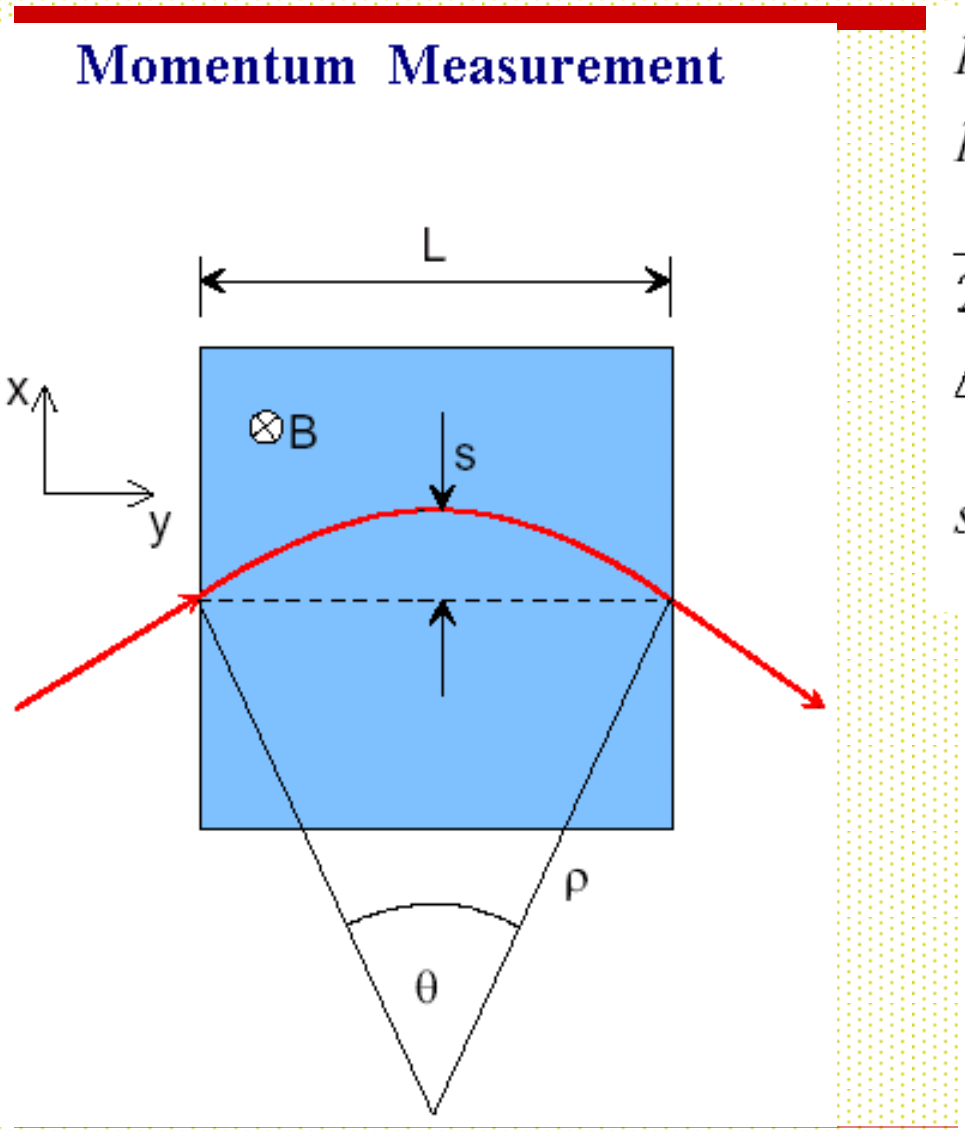
+ Πεδίο πάντα εγκάρσιο στην ορμή
+ Σχετικά μεγάλα πεδία επάνω σε μεγάλους όγκους ανιχνευτών
+ Δεν απαιτείται ζεύγος επιστροφής
+ Σχετικά μικρός προϋπολογισμός για υλικά
- ΜΗ-Ομογενές πεδίο
- Σύνθετη δομή

• ATAS Toroidal Magnet •



- *20.1 m diam. x 25.3 m length*
- *~12000 m^3 volume*
- *118 t superconductor*
- *370 t cold mass*
- *830 t total weight*
- *56 km superconductor*
- *20.5 kA at 4.6 T*
- *1.05 GJ stored Energy*

Φασματόμετρο Μιονίων: *Monitored Drift Tubes*



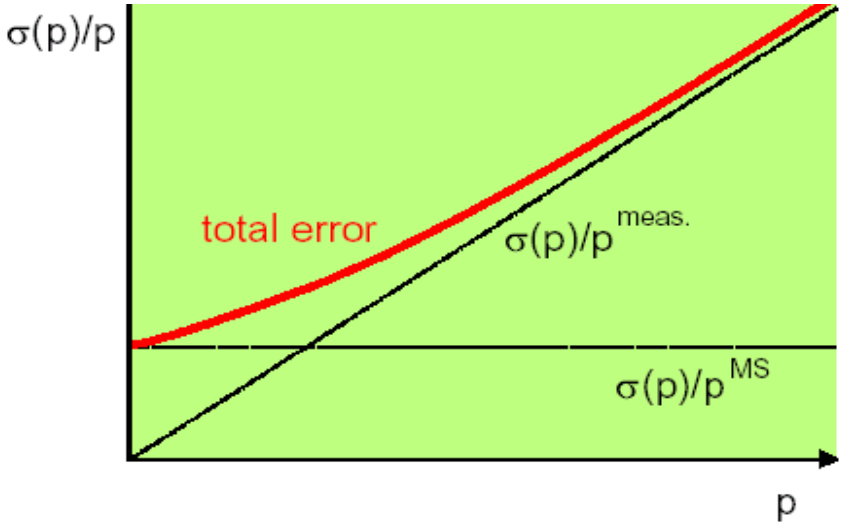
$$p_T = qB\rho$$

$$p_T\ (\mathrm{GeV/c}) = 0.3B\rho \quad (\mathrm{T \cdot m})$$

$$\frac{L}{2\rho} = \sin\theta/2 \approx \theta/2 \quad \rightarrow \quad \theta \approx \frac{0.3L \cdot B}{p_T}$$

$$\Delta p_T = p_T \sin\theta \approx 0.3L \cdot B$$

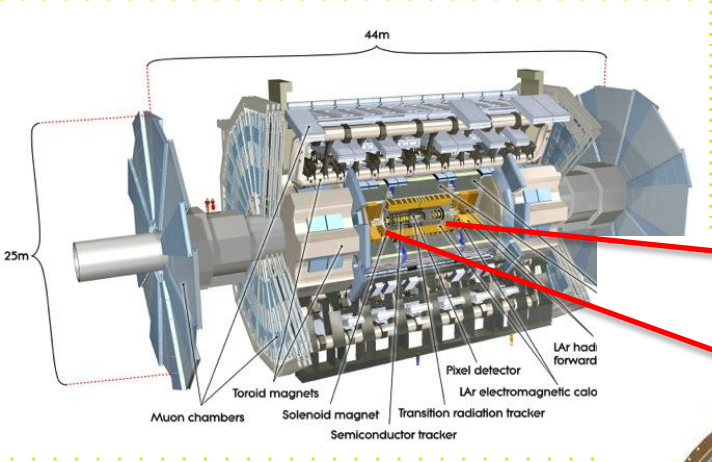
$$s = \rho(1-\cos\theta/2) \approx \rho\frac{\theta^2}{8} \approx \frac{0.3}{8}\frac{L^2 B}{p_T}$$

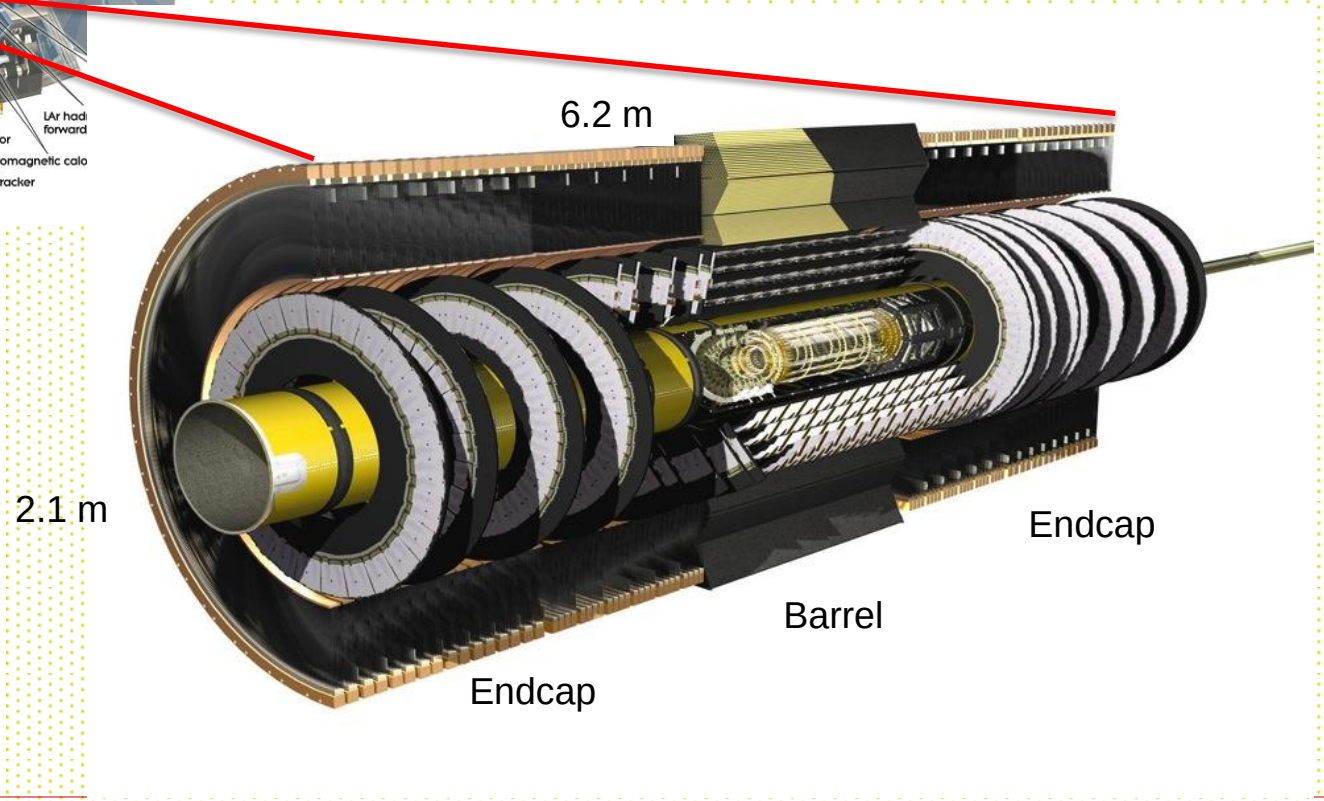


Ανιχνευτές Τροχιών

- Μετρούν όλα τα φορτισμένα σωματίδια καθώς προκύπτουν από το σημείο αλληλεπίδρασης, έχοντας την ελάχιστη διαταραχή σε αυτά
- Μετρούν την τροχιά που διαγράφουν τα φορτισμένα σωματίδια
  - Μετρούν διάφορα σημεία (ίχνη) κατά μήκος της τροχιάς που προσδιορίζεται με καμπύλη πάνω στα ίχνη (έλικας, ευθεία, κλπ)
- Προσδιορίζουν την ορμή
  - Από την καμπυλόγραμμη τροχιά των σωματιδίων σε μαγνητικό πεδίο
- Επεκτείνοντας πίσω την τροχιά, βρίσκουμε το αρχικό σημείο
  - Ανασύσταση αρχικών κορυφών
- Ανασύσταση δευτερογεννών κορυφών
  - Τα μεγάλης διάρκειας ημιζωής σωματίδια have a measurable displacement between primary vertex and decay
- Συνδυάζουν τις τροχιές με τους καταιγισμούς στα θερμιδόμετρα ή τις τροχιές στα συστήματα μιονίων
- Συνεισφέρουν και στην ταυτοποίηση των σωματιδίων
  - Με την μέτρηση του ρυθμού απώλειας ενέργειας (dE/dx)
  - Χρησιμοποιούν καταλληλους ανιχνευτές για να διακρίνουν τα διαφορετικά σωματίδια (TR, TOF, RICH)

• ATLAS Ανιχνευτής Τροχιών •

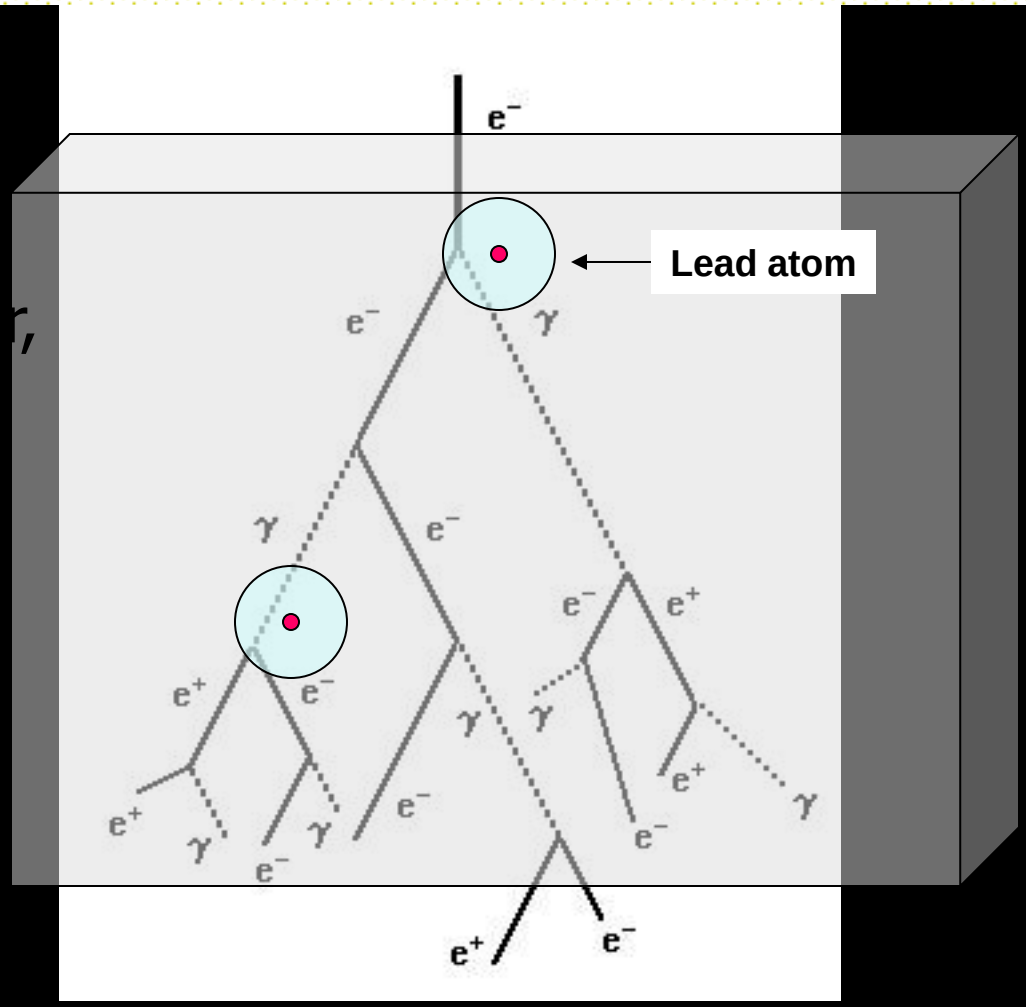




Θερμιδόμετρα - Calorimeters

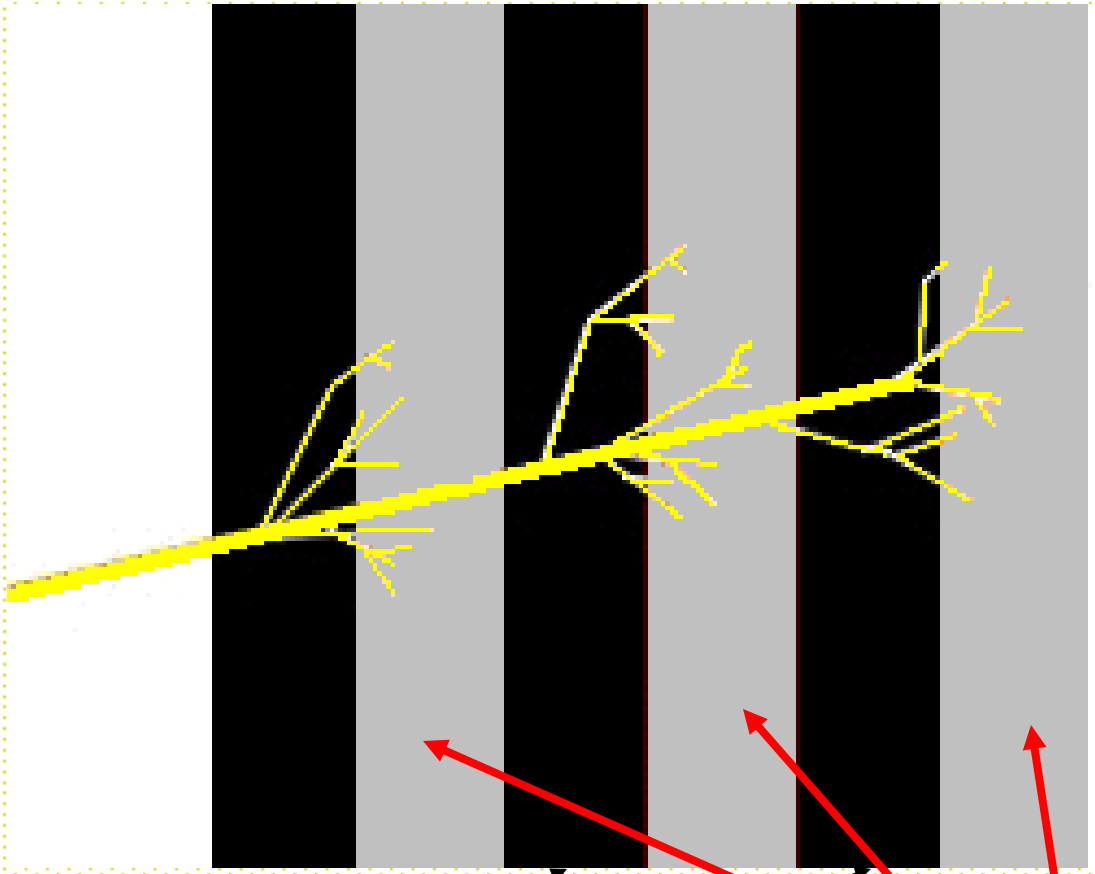
- Βασική Αρχή Λειτουργίας:
  - Κατά την αλληλεπίδραση του σωματιδίου με πυκνό υλικό ΟΛΗ, σχεδόν η ενέργειά του μετατρέπεται σε *δευτερογενή σωματίδια ή σε θερμότητα*.
  - Αυτά τα δευτερογενή σωματίδια καταγράφονται ως:
    - Αριθμός, Ενέργεια, Πυκνότητα δευτερογενών
    - είναι *ανάλογα με* την **αρχική**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

Ηλεκτρομαγνητικοί Καταιγισμοί



Πώς μετράμε τα δευτερογενή σωματίδια?

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



Δομή Sandwich !!!

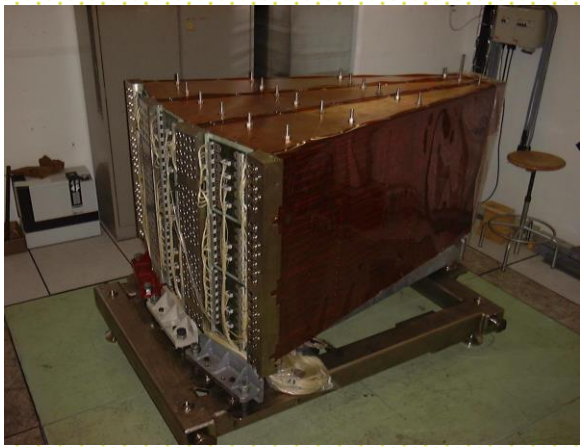
Το συνολικό ποσό σημάτων είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ενέργειας

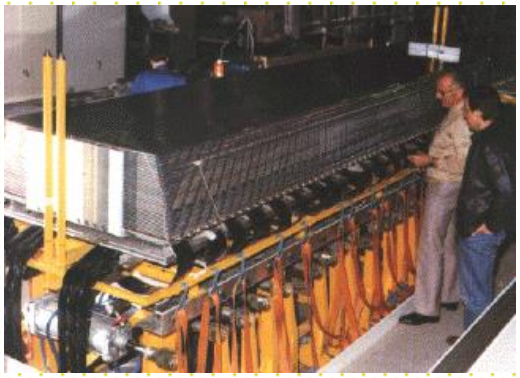
Αλλά χρειάζεται να βαθμονομηθεί με δέσμες γνωστής ενέργειας!

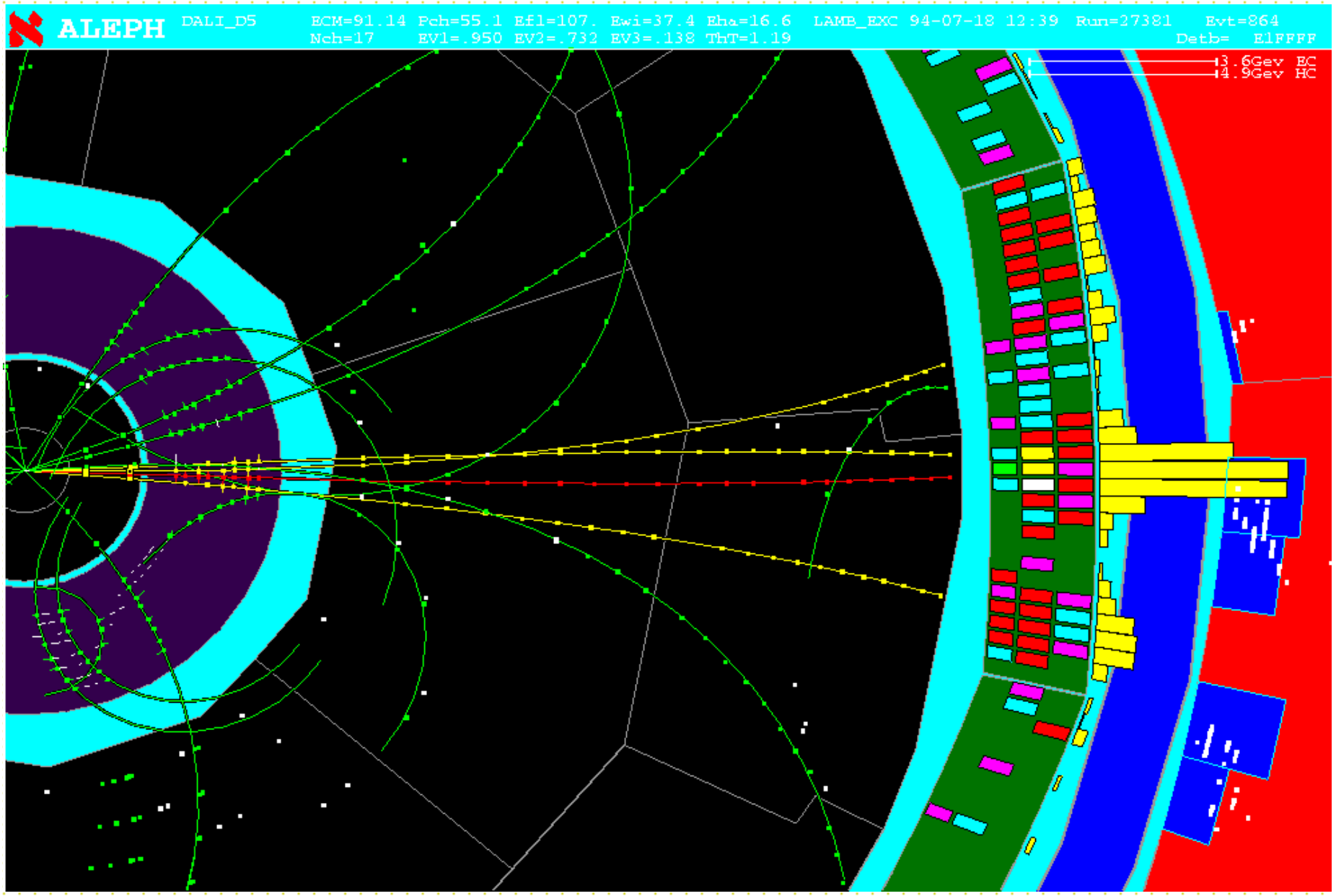
Πυκνό υλικό, π.χ. Μόλυβδος

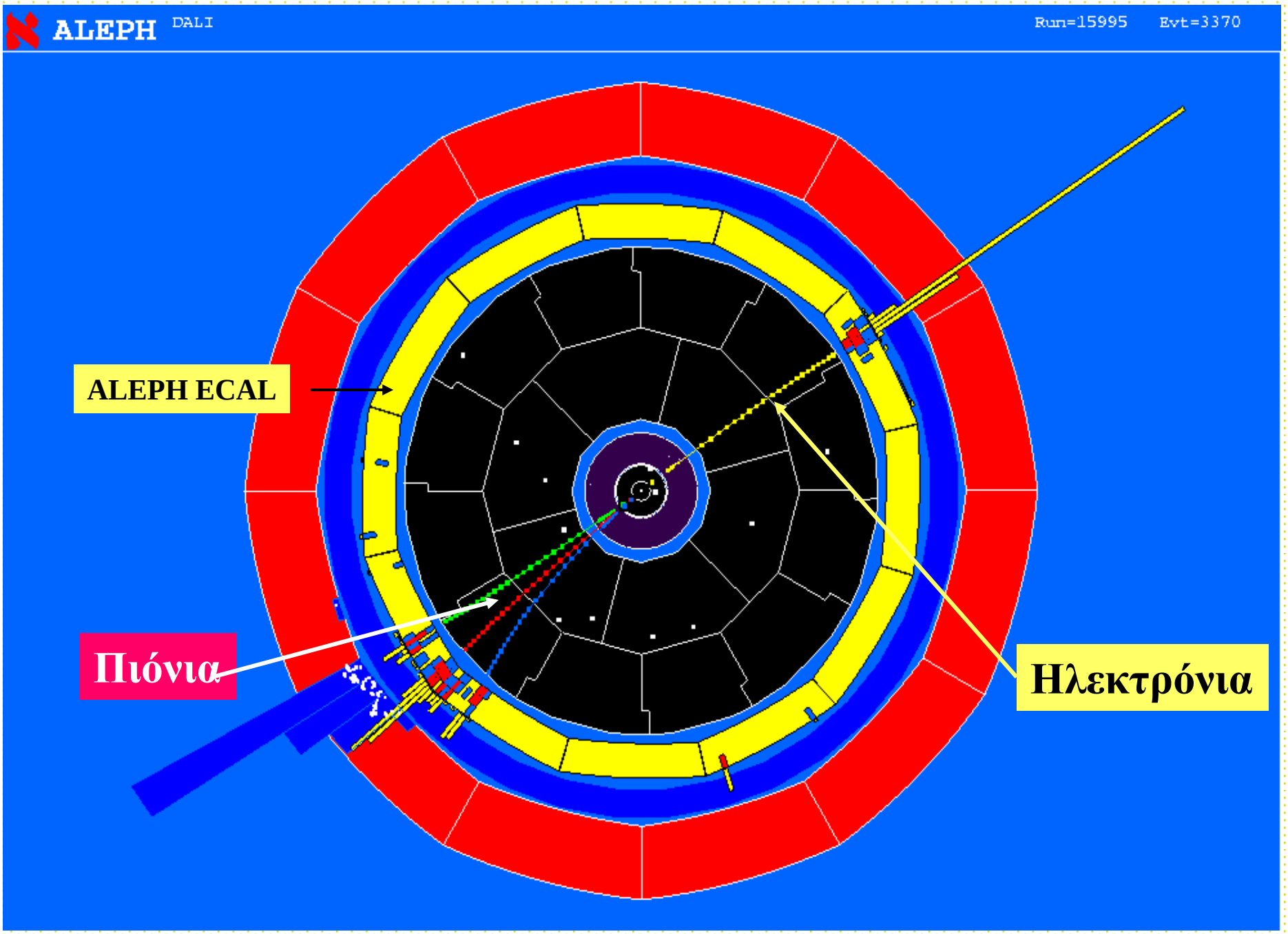
Ανιχνευτές, όπως θάλαμοι αερίου, ή σπινθηριστές

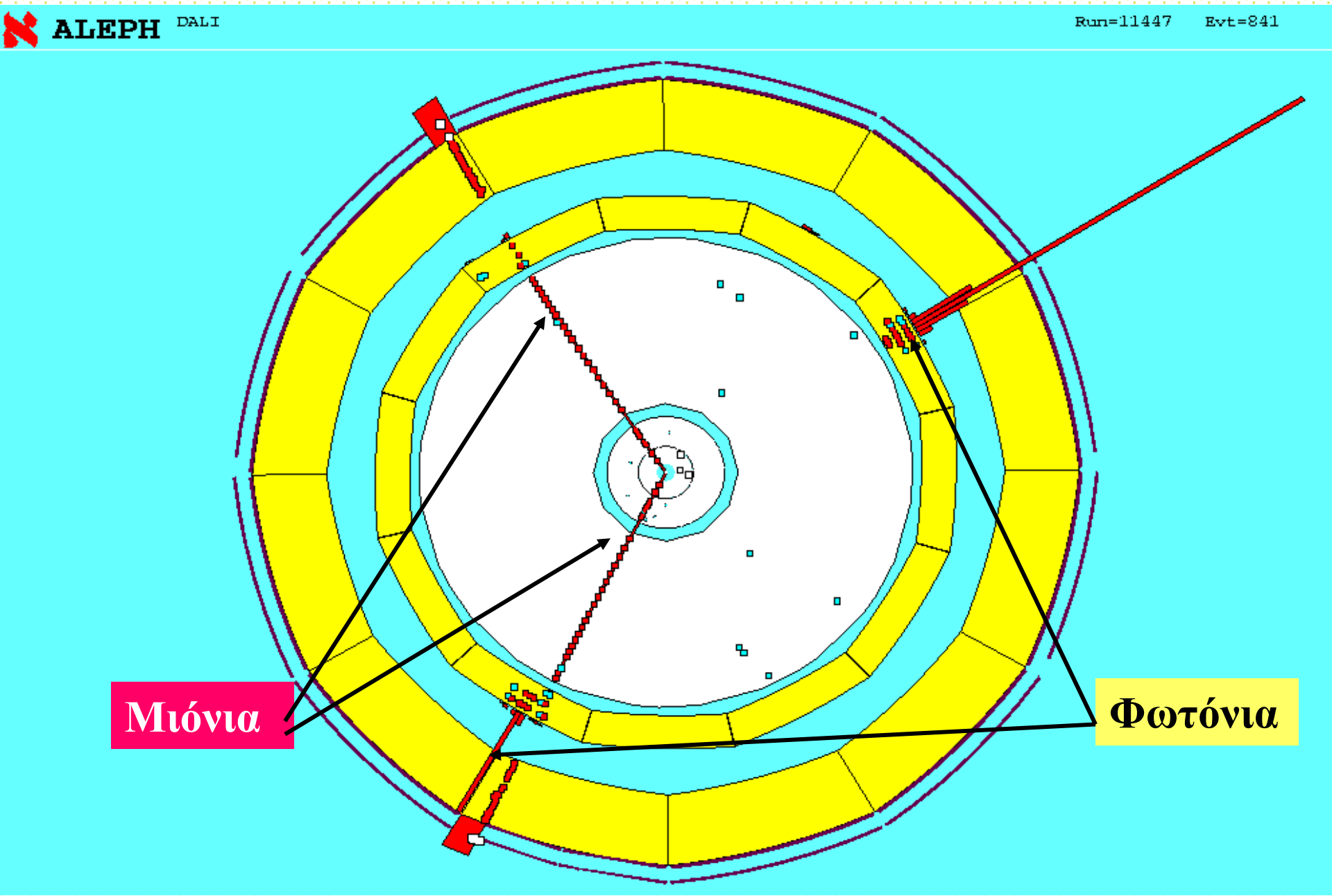
Θερμιδόμετρα Δειγματισμού





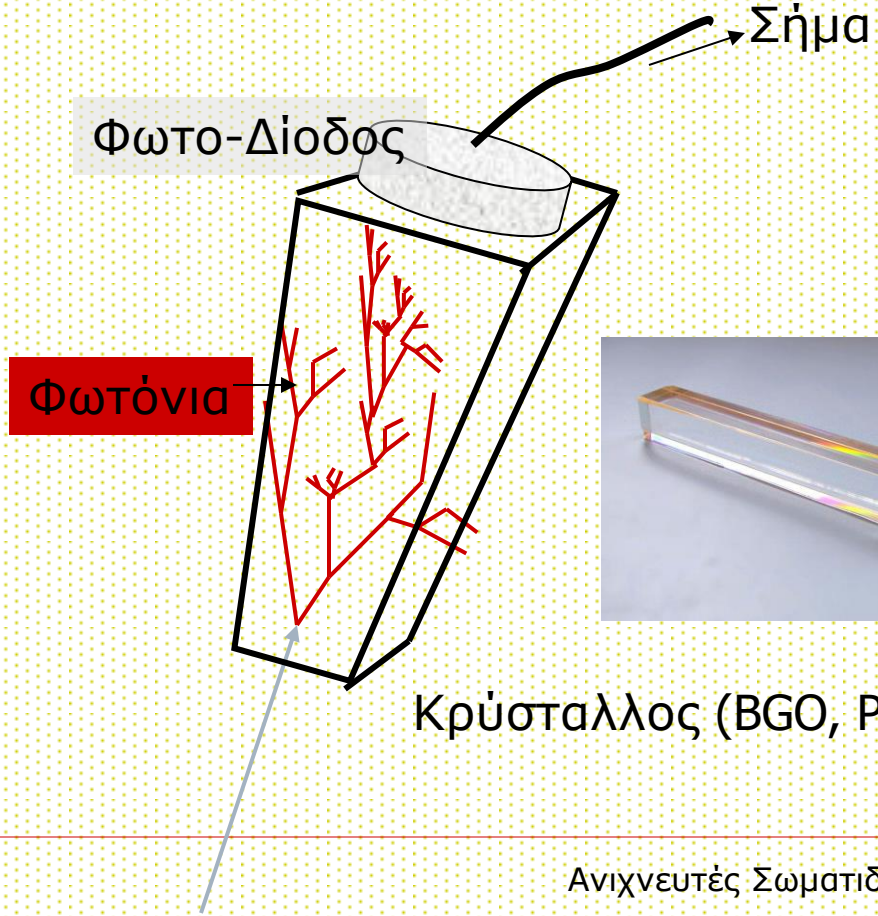

ALEPH
DALI_D5
ECM=91.14 Pch=55.1 Efl=107. Ewi=37.4 Eha=16.6 LAMB_EXC 94-07-18 12:39 Run=27381 Evt=864
Nch=17 EV1=.950 EV2=.732 EV3=.138 ThT=1.19
Detb= E1FFFF
3.6Gev EC
4.9Gev HC

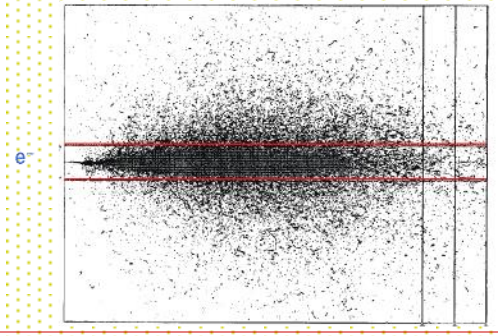

ALEPH
DALI
Run=15995
Evt=3370
ALEPH ECAL
Πιόνια
Ηλεκτρόνια


ALEPH
DALI
Run=11447
Evt=841
Μιόνια
Φωτόνια

Πώς μετράμε τα δευτερογενή σωματίδια?

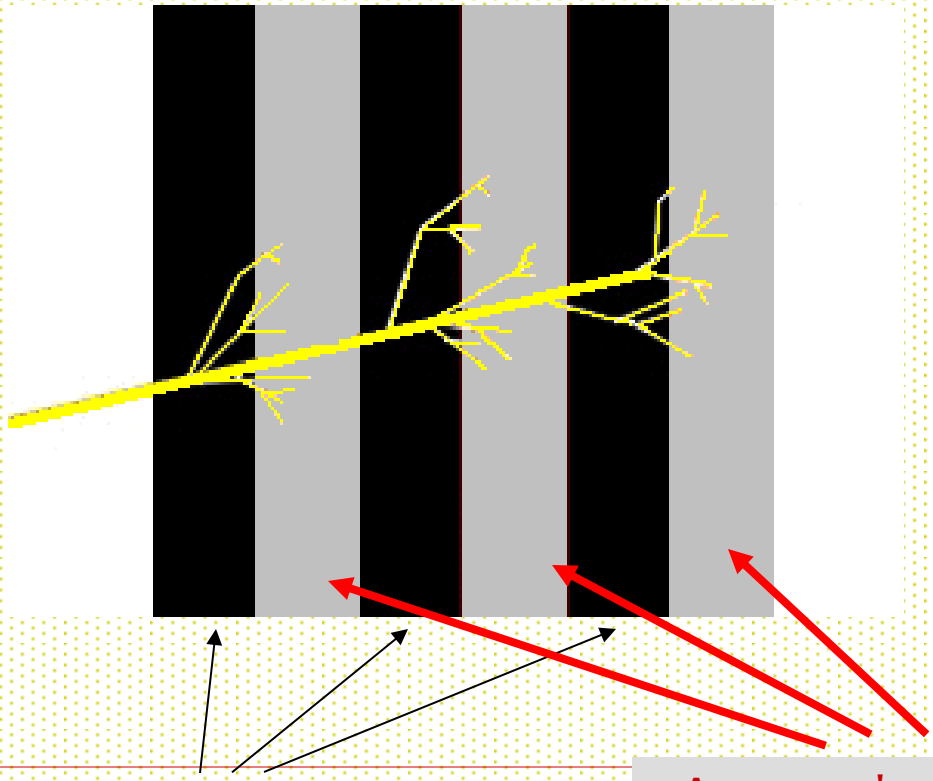
- 2. Με **ομογενή θερμιδόμετρα**, **όπως τα θερμιδόμετρα κρυστάλλων**:





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

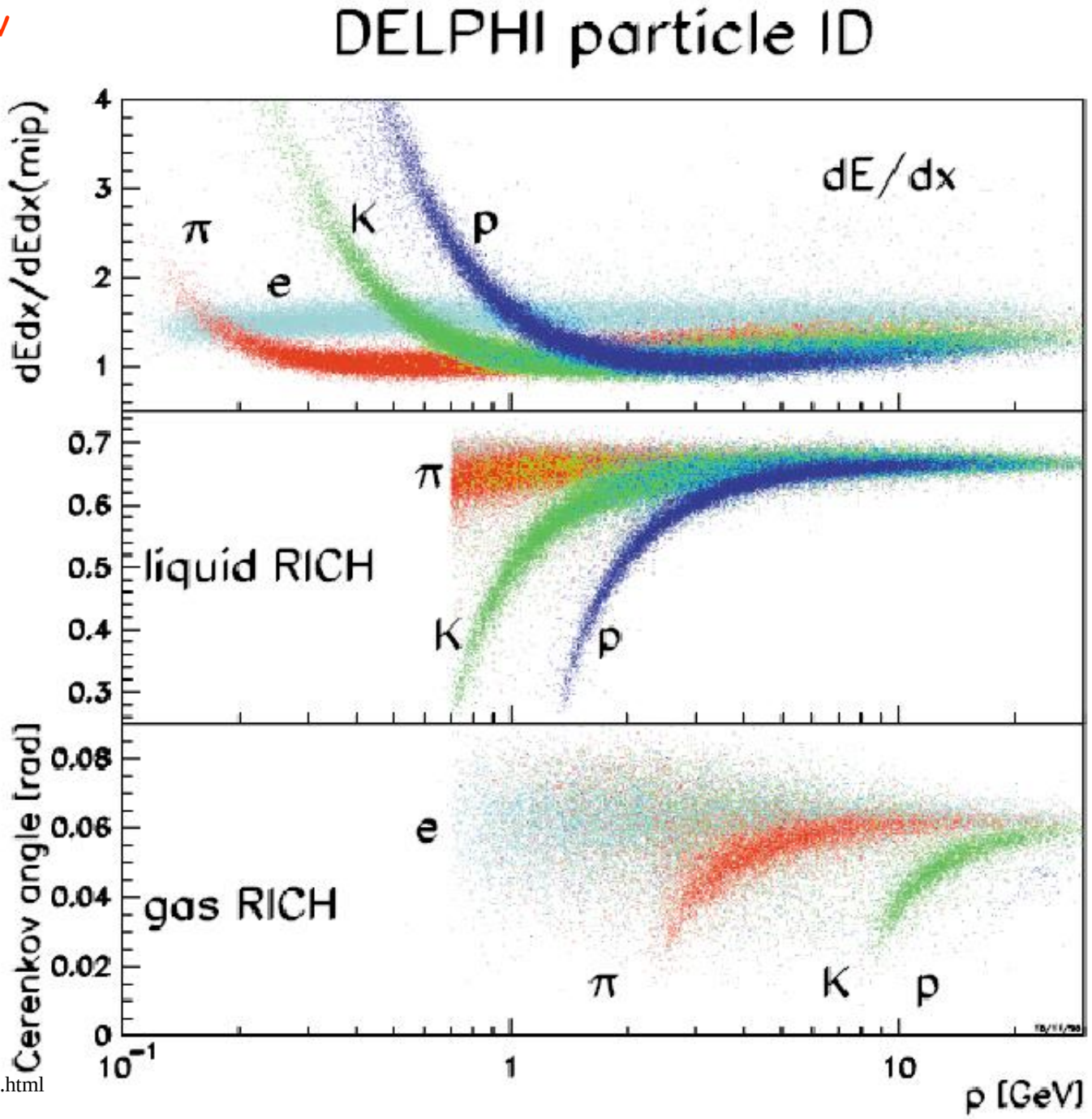
Ταυτοποίηση Σωματιδίων

- 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

Ταυτοποίηση Σωματίδιων
με
DELPHI
TPC
και
RICHes

Για δεδομένα:

p από Λ
K από Φ D*
π από K°



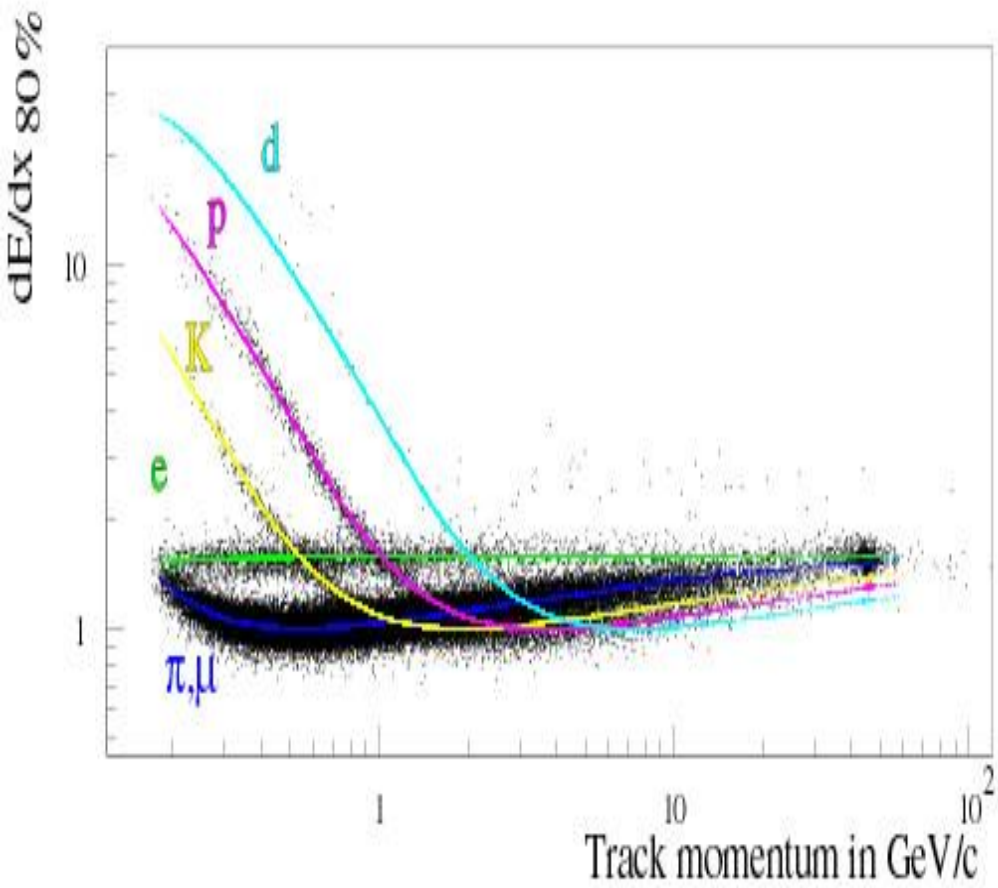
http://delphiwww.cern.ch/delfigs/export/pubdet4.html
DELPHI, NIM A: 378(1996)57

Μέση Απώλεια Ενέργειας

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

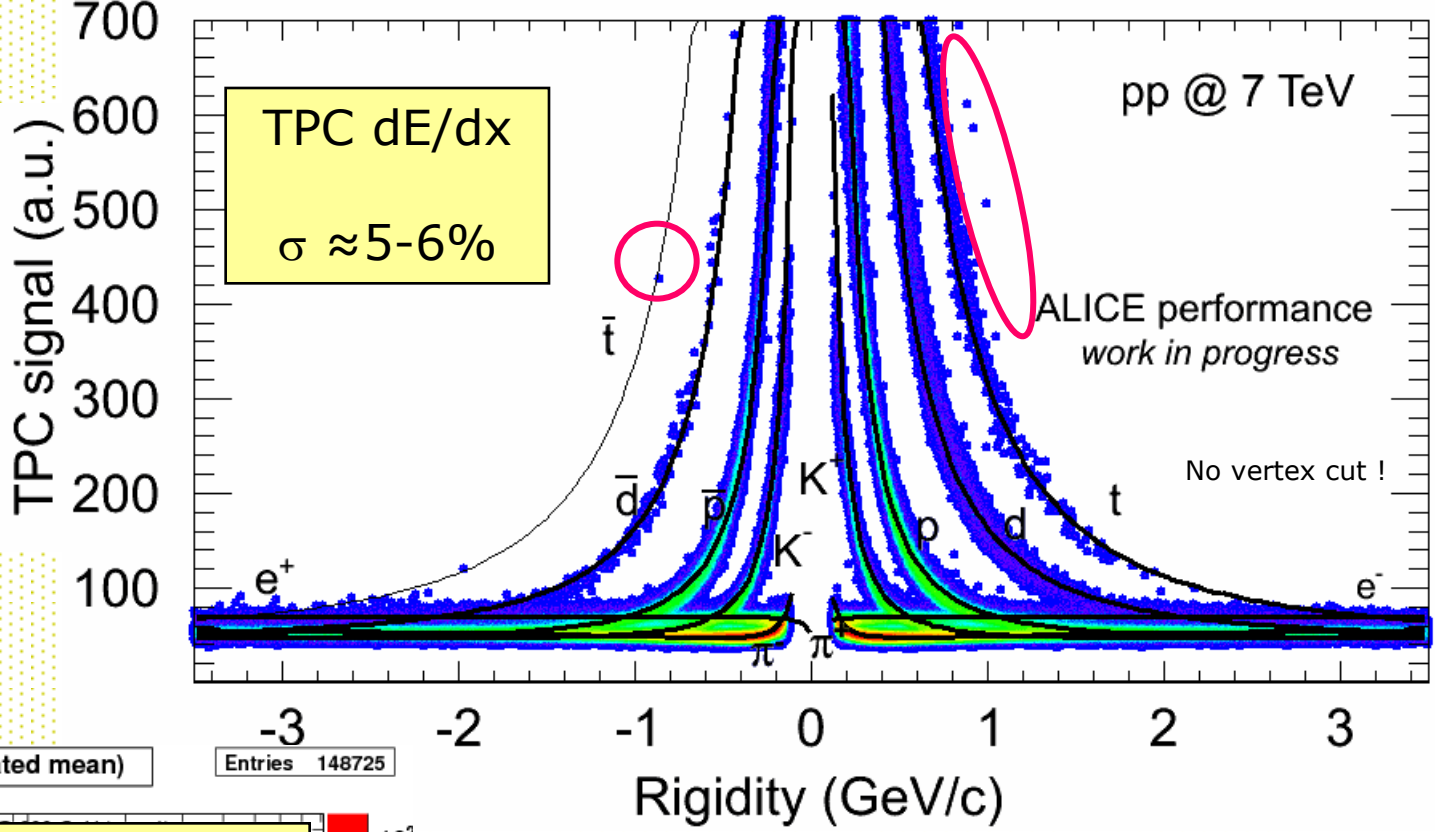
$E_{απώλ.}$ / Μήκος Διαδρομής ~ Ταχύτητα Σωμ. ~ v/c)

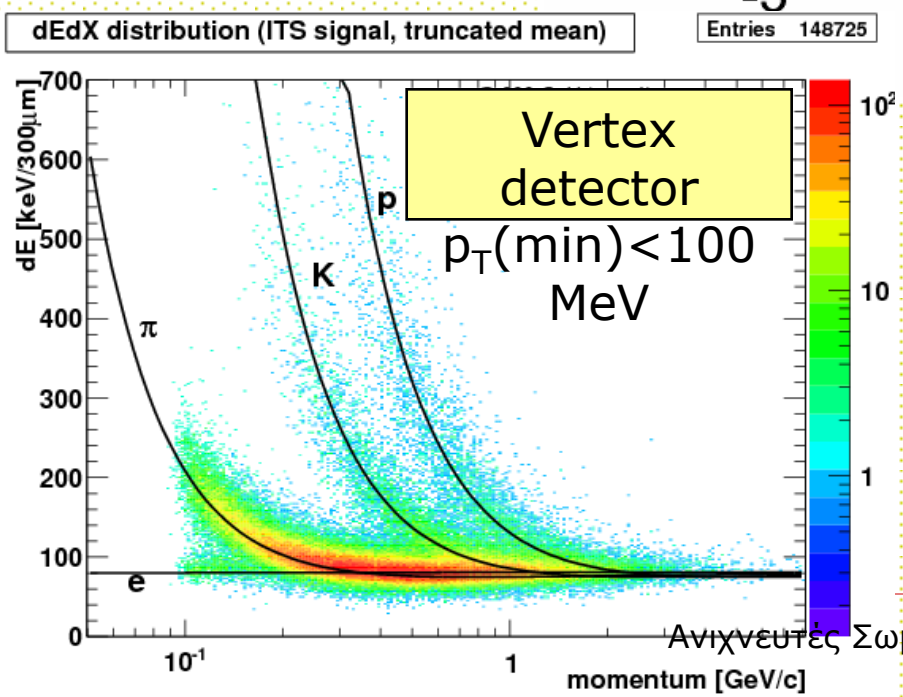
E_{lost} ~ ποσό ιοντισμού ~ μέγεθος σημάτων στα ανοδικά σύρματα

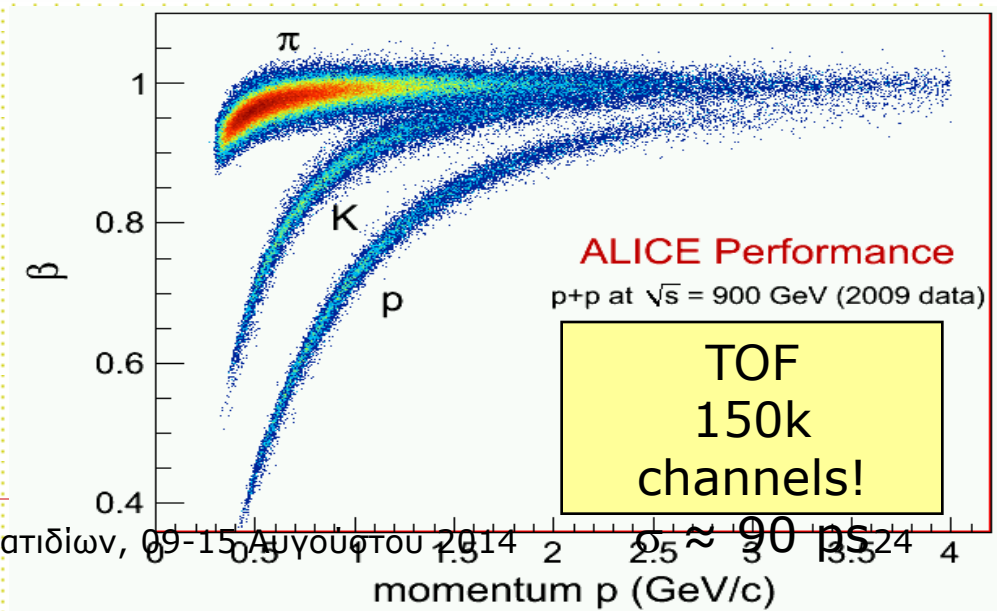


Η σχεδίαση ως προς ταχύτητα (**v**) και **όχι** ως προς ορμή (**p**) θα έδινε ΟΛΕΣ τις ζώνες πάνω στη ίδια θέση!

ALICE: PID detectors

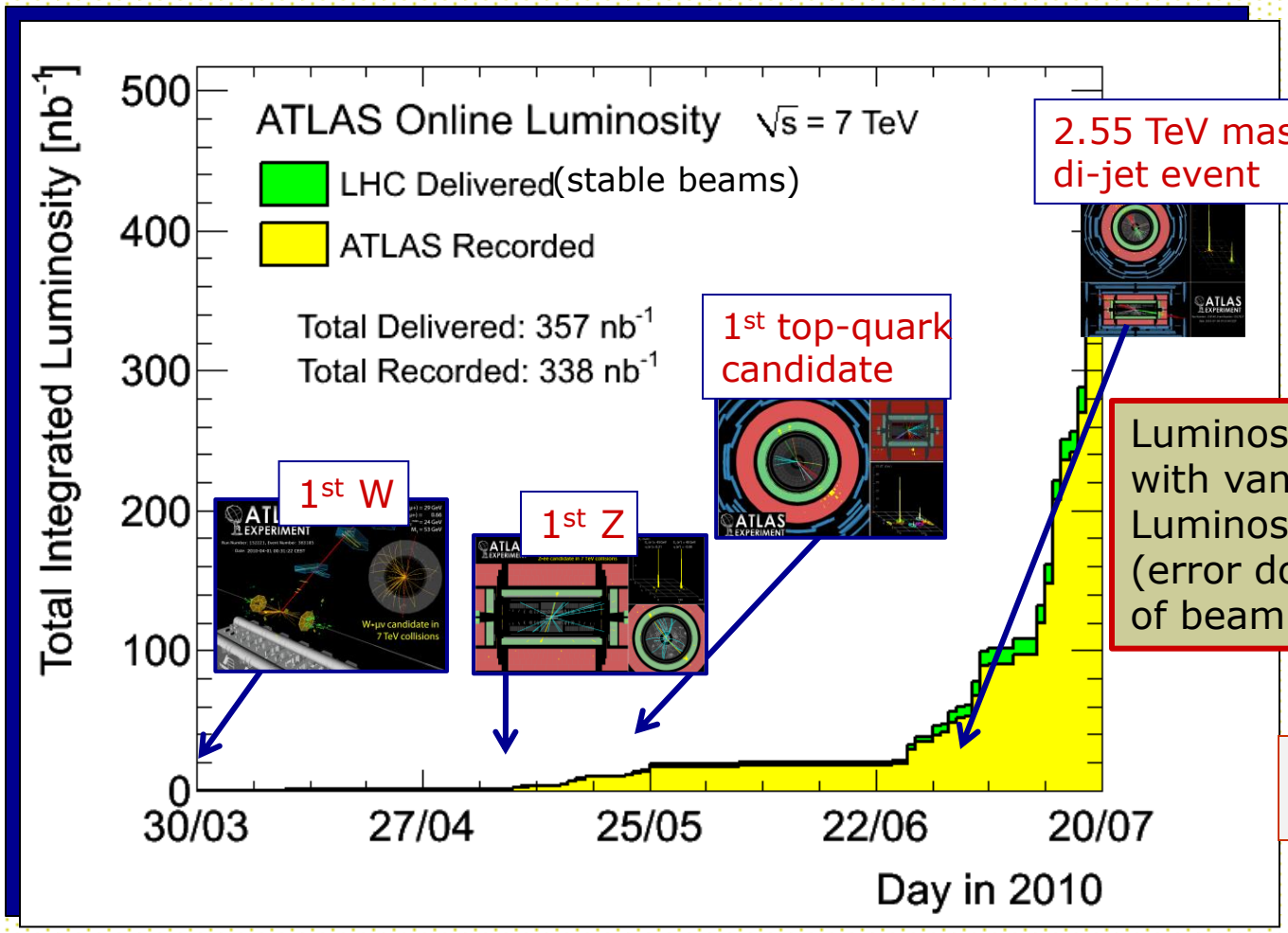






$\sigma \approx 90$ ps

Integrated luminosity vs time
(from first √s =7 TeV collisions on 30 March 2010



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

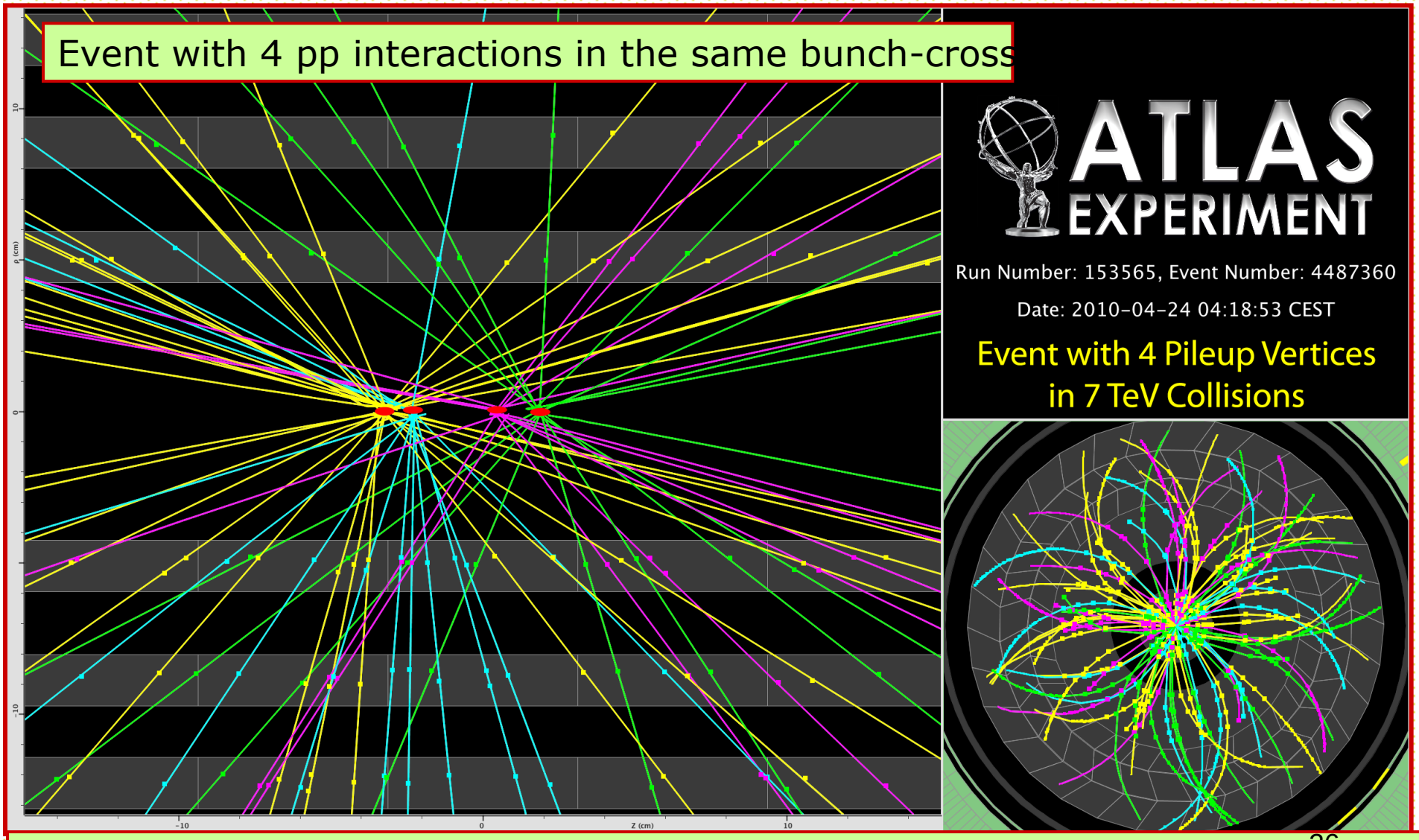
Peak luminosity in ATLAS $L \sim 1.6 \times 10^{30}\ cm^{-2}\ s^{-1}$

Overall data taking efficiency (with full detector on): 95%

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)



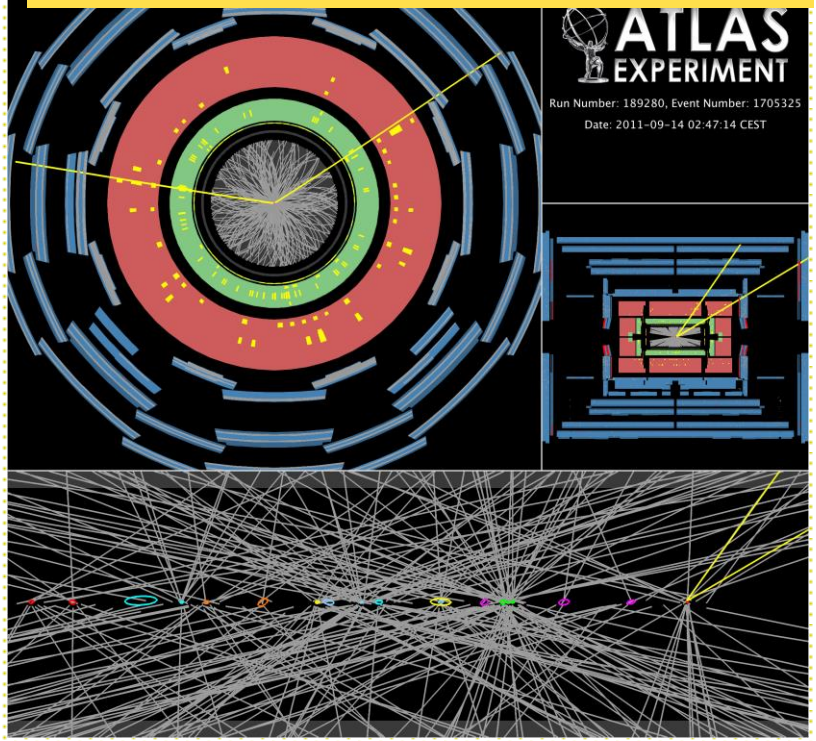
~ 10-45 tracks with p_T >150 MeV per vertex

Vertex z-positions : −3.2, −2.3, 0.5, 1.9 cm (vertex resolution better than~200 μm)

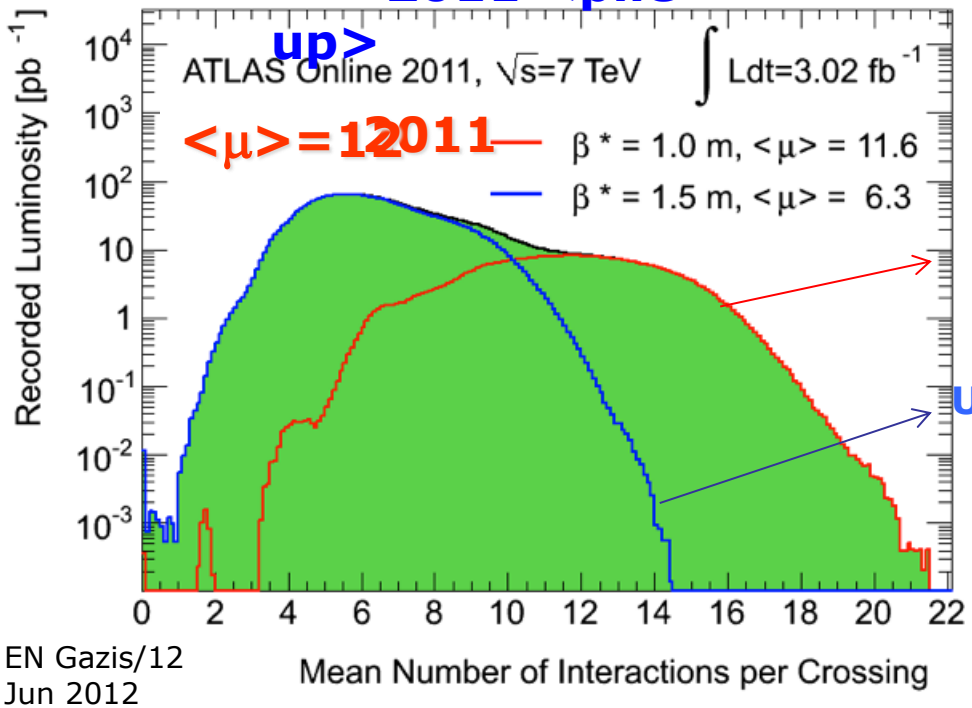
Pile-up challenge 2011

- ~x2 lower than LHC design
- 2011 <pile-up> =12 (up to 22 max)
- In September increasedx1.5 (β*=1.5m→1m)
- 2010 <pile-up> =1.3
- A potential issue for: Lepton Isolation, Vertexing, CPU time/event size, t, Jet Energy Scale/resolution, E_{Tmiss}.

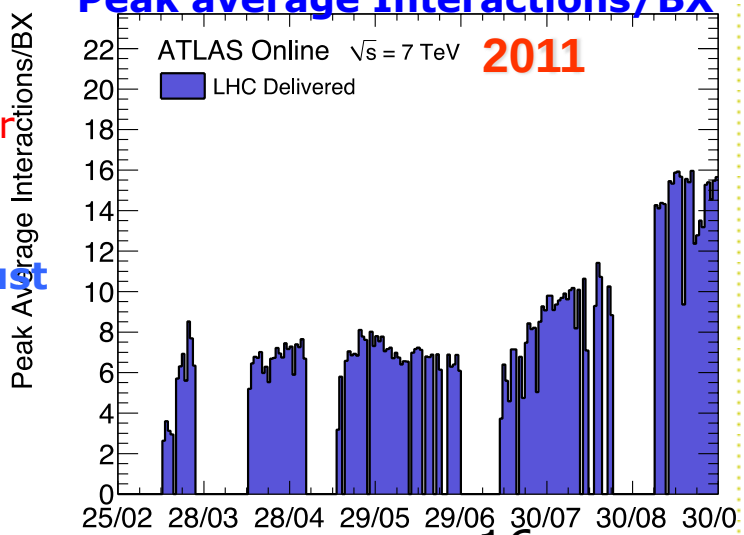
Z->mm with 20 reconstructed vertices



2011 <pile-up>

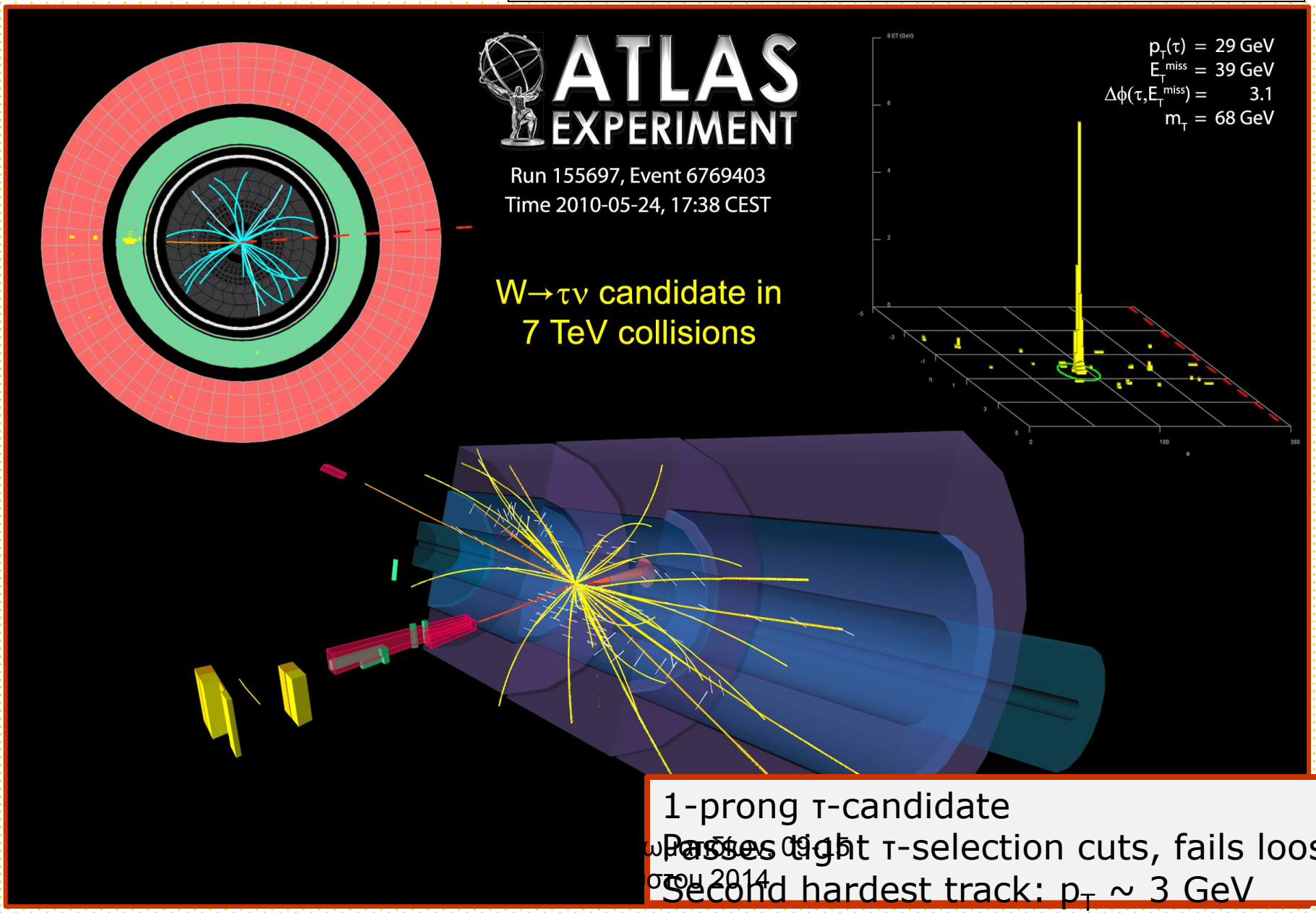


Peak average Interactions/BX



W → τν candidate

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



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

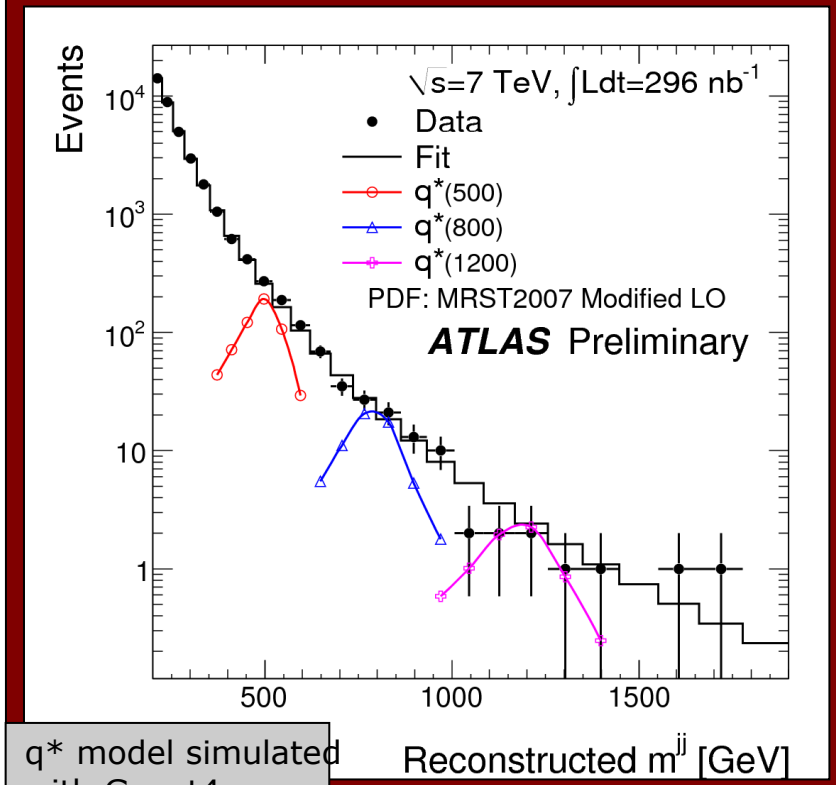
Searches for excited quarks: q*→ jj

Full data sample analysed

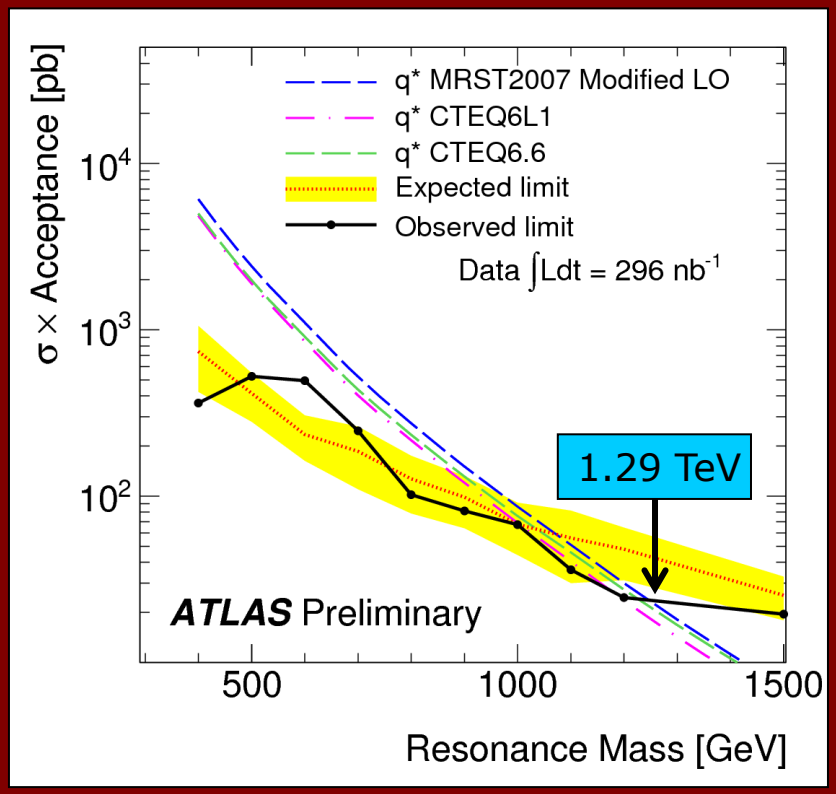
Looked for di-jet resonance in the measured M(jj) distribution
→ spectrum compatible with a smooth monotonic function → no bumps

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

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

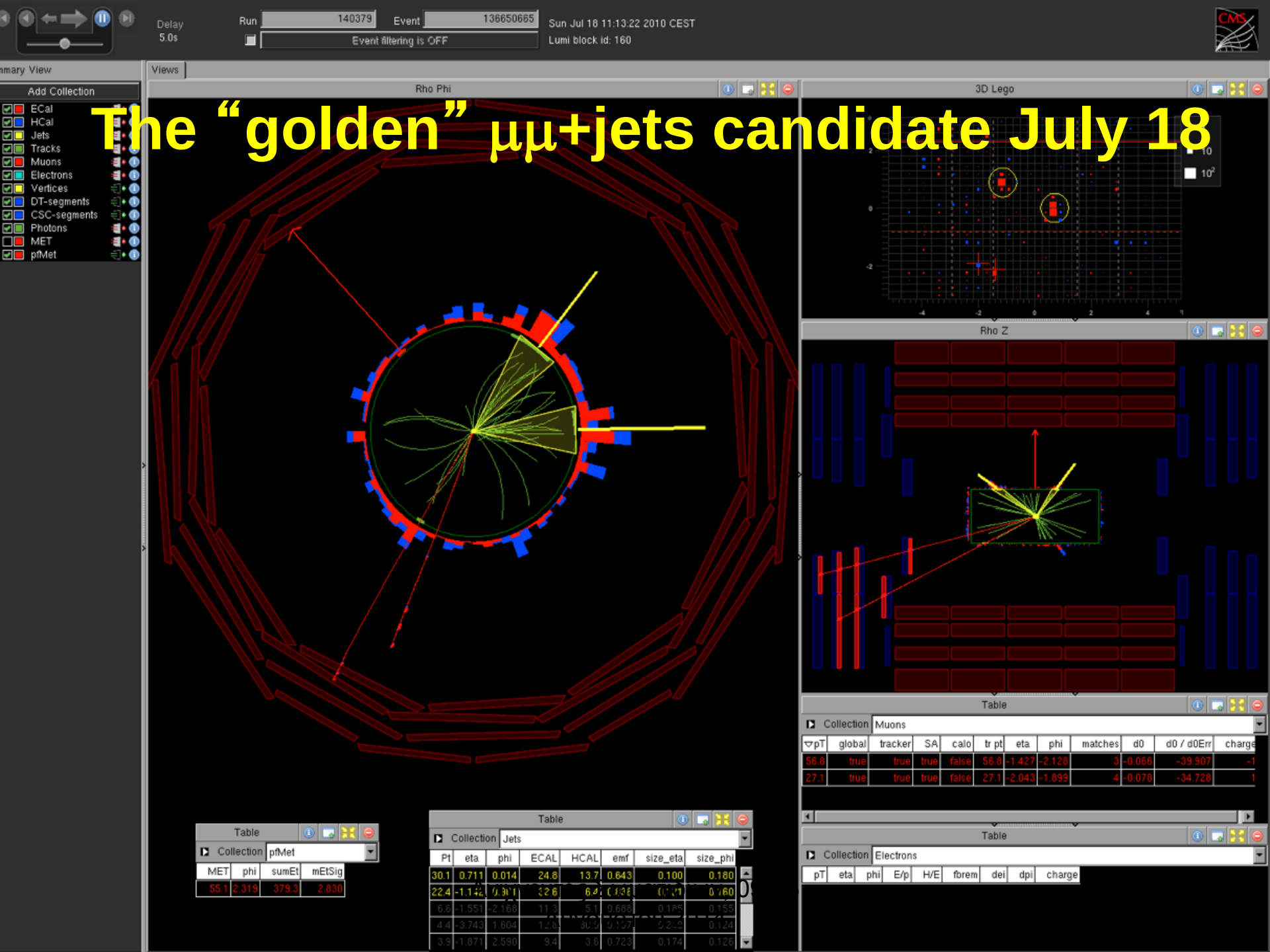


q* model simulated with Geant4

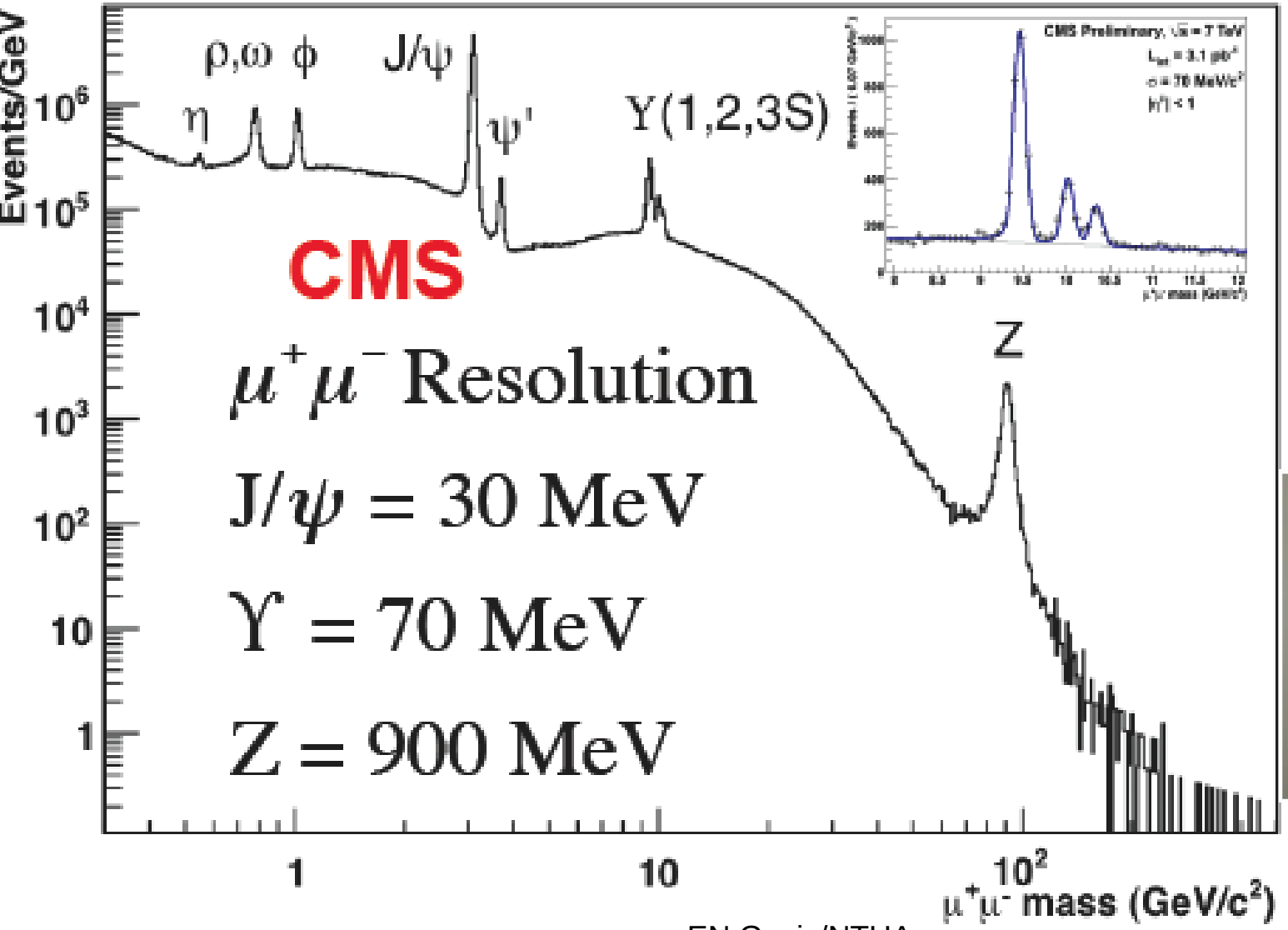


- Experimental systematic uncertainties included: luminosity, JES (dominant), background fit, ..
- Impact of different PDF sets studied → with CTEQ6L1: 0.4 < M (q*) < 1.18 TeV

The “golden” μμ+jets candidate July 18

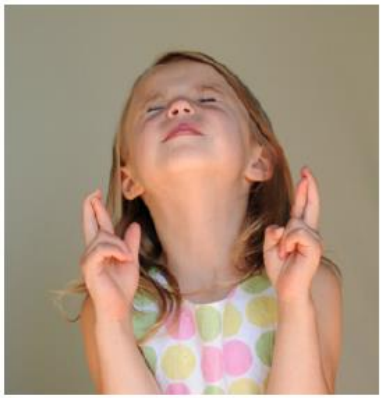


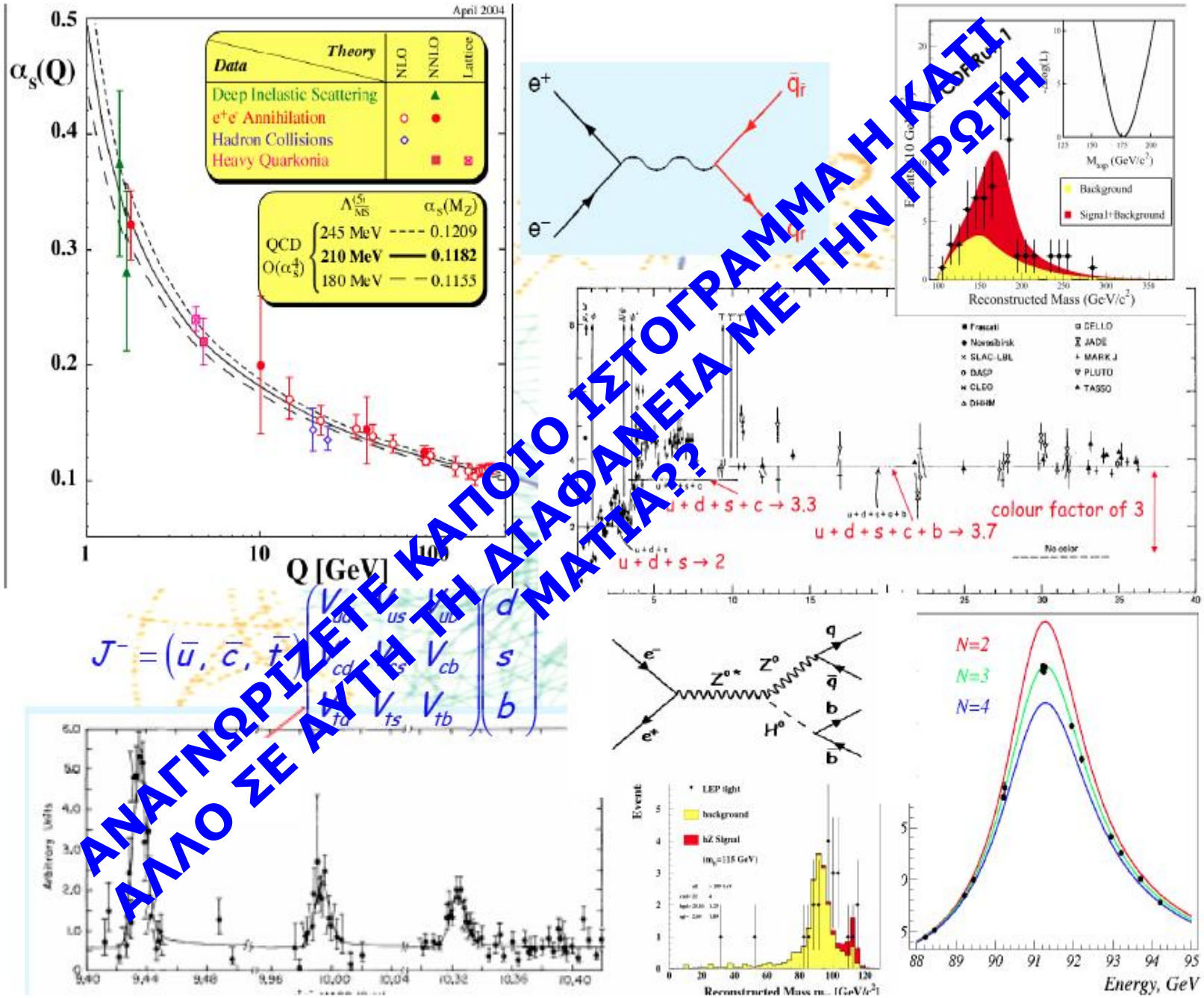
The SM re-discovered at the LHC!!



Φ	1970
J/ψ	1974
Υ	1977
Z	1984

Higgs 2012!!




ΑΝΑΓΝΩΡΙΖΕΤΕ ΚΑΠΟΙΟ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ Η ΚΑΤΙ ΑΛΛΟ ΣΕ ΑΥΤΗ ΤΗ ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΜΑΤΙΑ??
April 2004
$\alpha_s(Q)$
Q [GeV]
Theory
Data
NLO
NNLO
Lattice
Deep Inelastic Scattering
e^+e^- Annihilation
Hadron Collisions
Heavy Quarkonia
QCD $O(\alpha_s^4)$
245 MeV 0.1209
210 MeV 0.1182
180 MeV 0.1155
e^+
e^-
$\bar{q}_{\bar{r}}$
q_r
Background
Signal+Background
Reconstructed Mass (GeV/c²)
Frascati
Novosibirsk
SLAC-LBL
DASP
CLEO
DHHM
CELLO
JADE
MARK J
PLUTO
TASSO
u + d + s + c → 3.3
u + d + s + c + b → 3.7
u + d + s → 2
colour factor of 3
No color
$J^- = (\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}) \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$
Z^{o*}
Z^o
H^o
LEP light
background
hZ Signal
Reconstructed Mass
N=2
N=3
N=4
Energy, GeV

$B^0 \to D^{*-}\mu^+\nu_\mu$

$\hookrightarrow \overline{D^0}\pi_S^-$

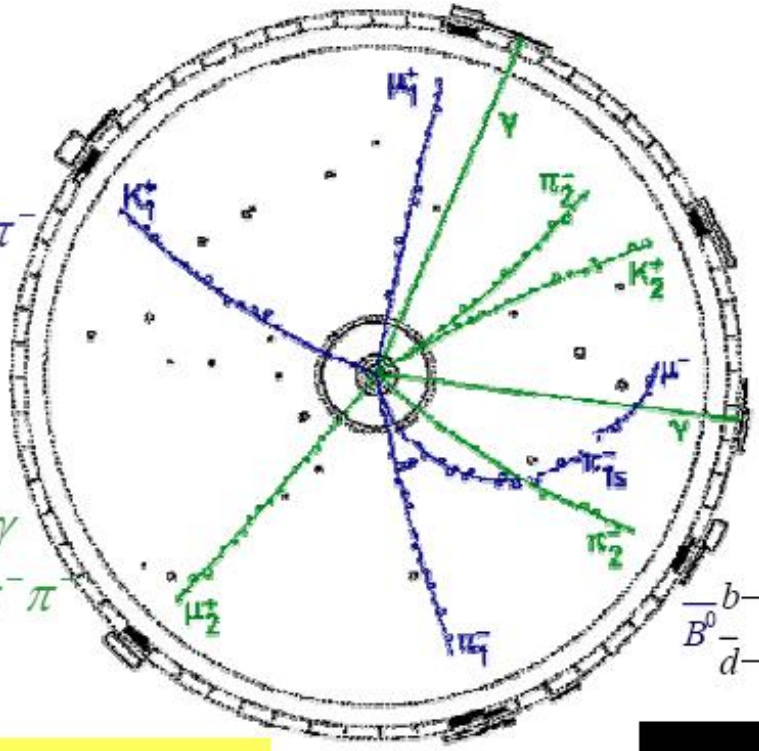
$\hookrightarrow K^+\pi^-$

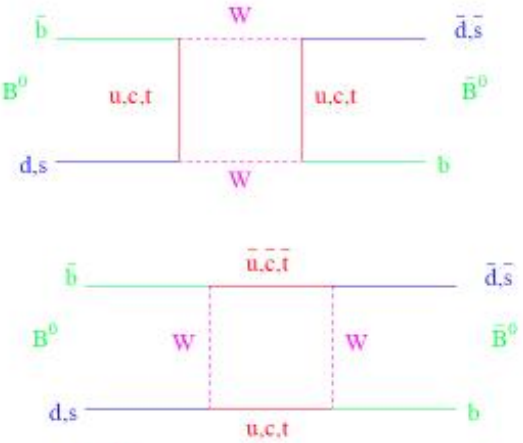
$B^0 \to D^{*-}\mu^+\nu_\mu$

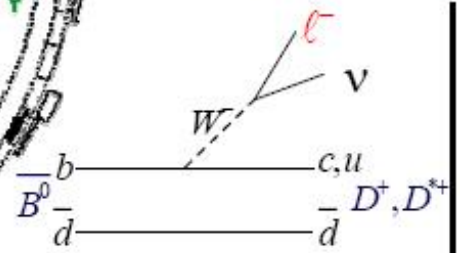
$\hookrightarrow D^-\pi^0$

$\hookrightarrow \gamma\gamma$

$\hookrightarrow K^+\pi^-\pi^-$

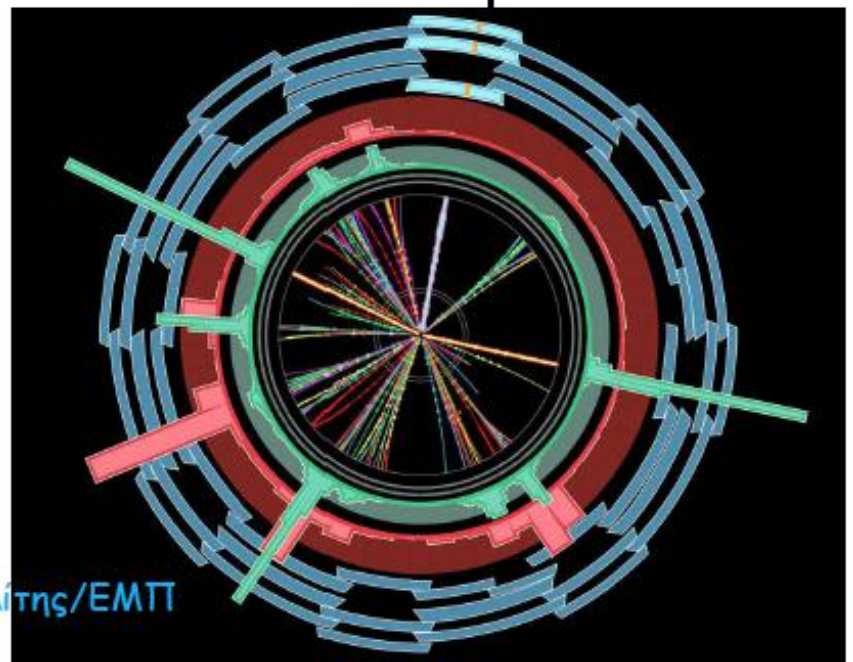




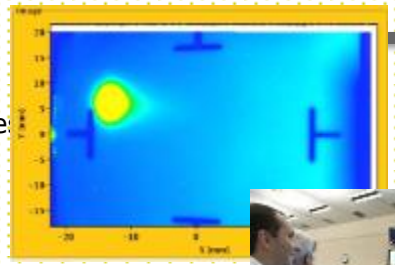


Discovery: ARGUS 1987

2009

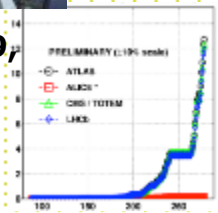


August 2008
First injection te



3.5 Te

November 29, 2009
Beam back



September 10, 2008
First beams around

October 14 2010
1e32
248 bunches

April 2010
Squeeze to 3.5 m

June 28 2011
1380 bunches

1380

fb^{-1}
1380
bunches

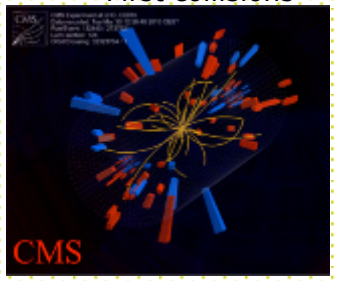
4 July, 2012
Higgs discovery

6 June, 2012
$6.8e^{33}$

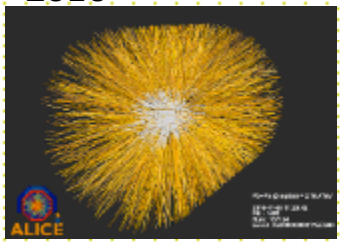
2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012

September 19, 2008
Disaster
Accidental release of 600MJ stored in one sector of LHC dipole magnets

March 30, 2010
First collisions

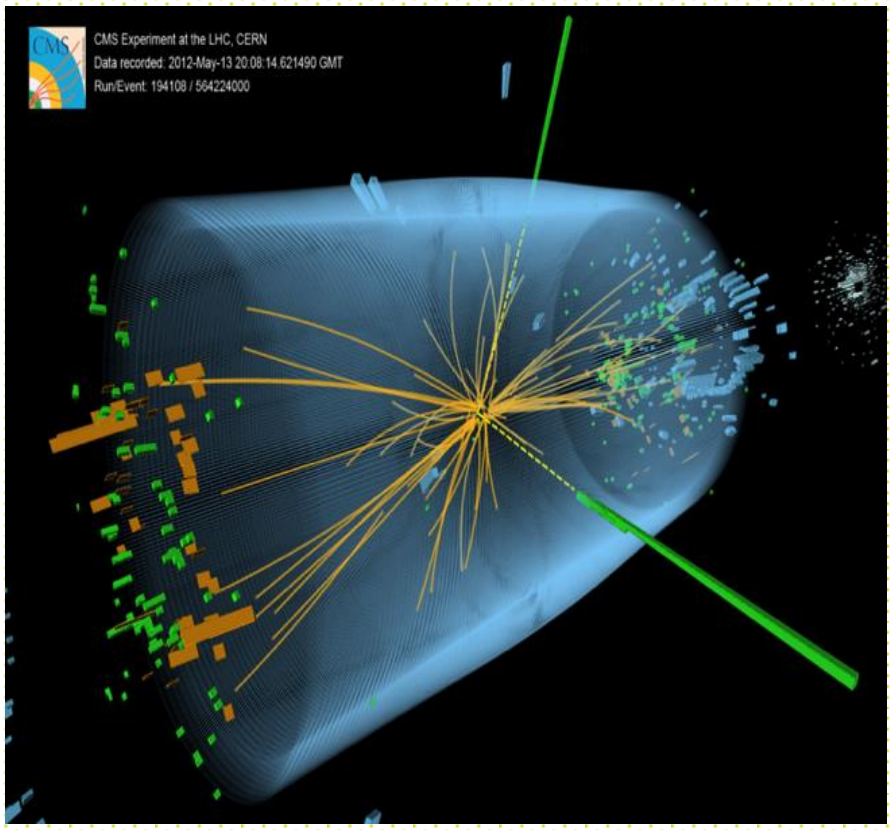


November 2010



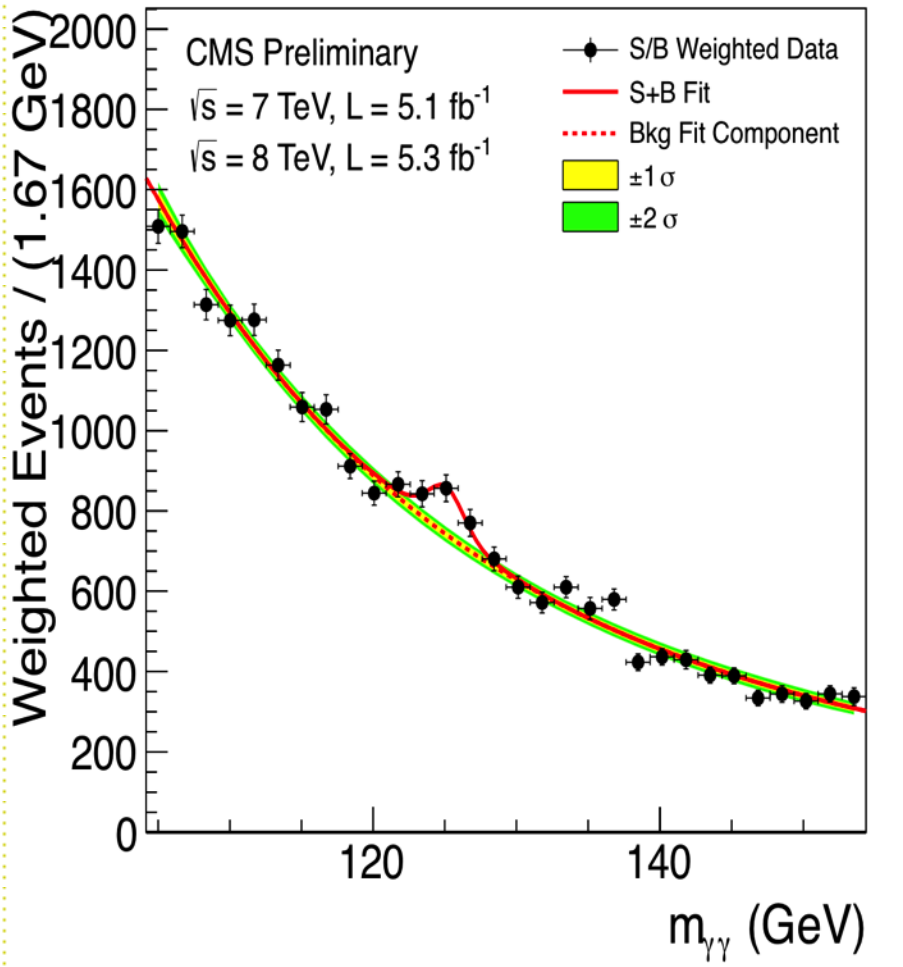
18 June, 2012
6.6 fb^{-1}
to ATLAS & CMS

pp → H → γγ



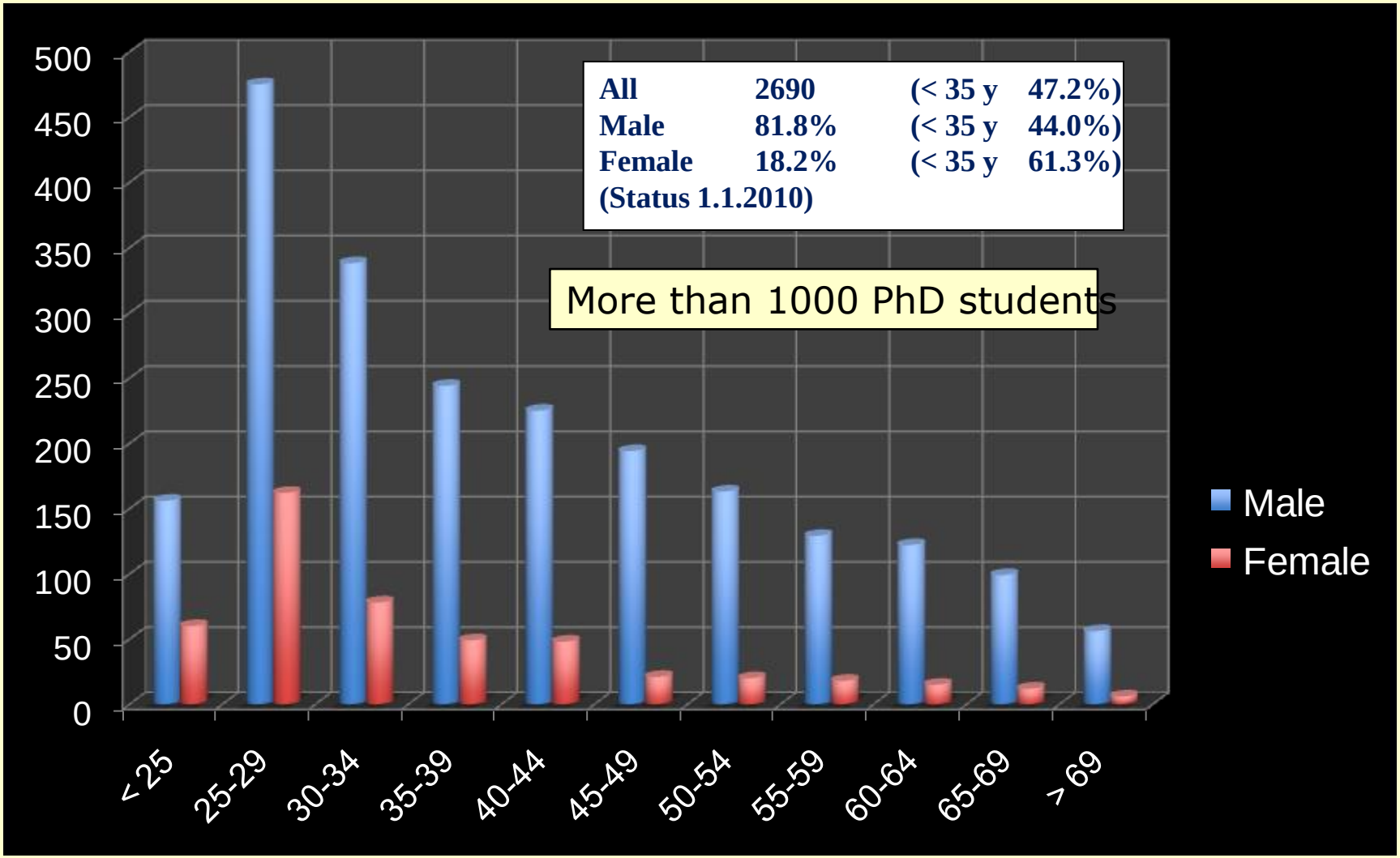
Dots = Datos

Lines = Simulation



BACKUP SLIDES

Age distribution of the ATLAS populatio

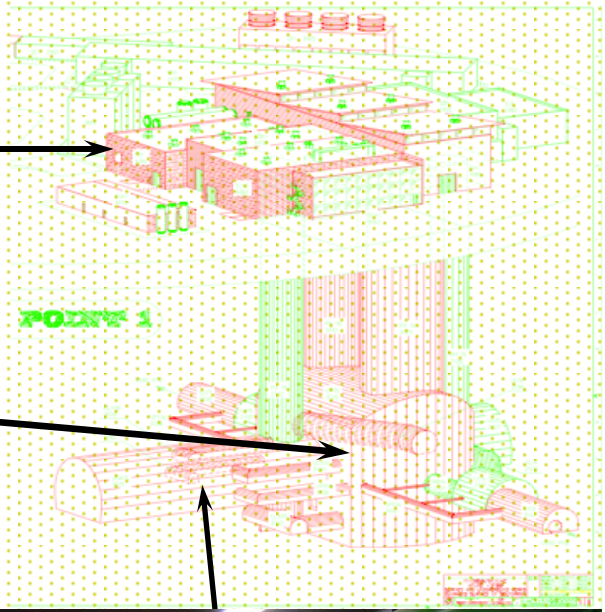


Υποδομή ενός πειράματος

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

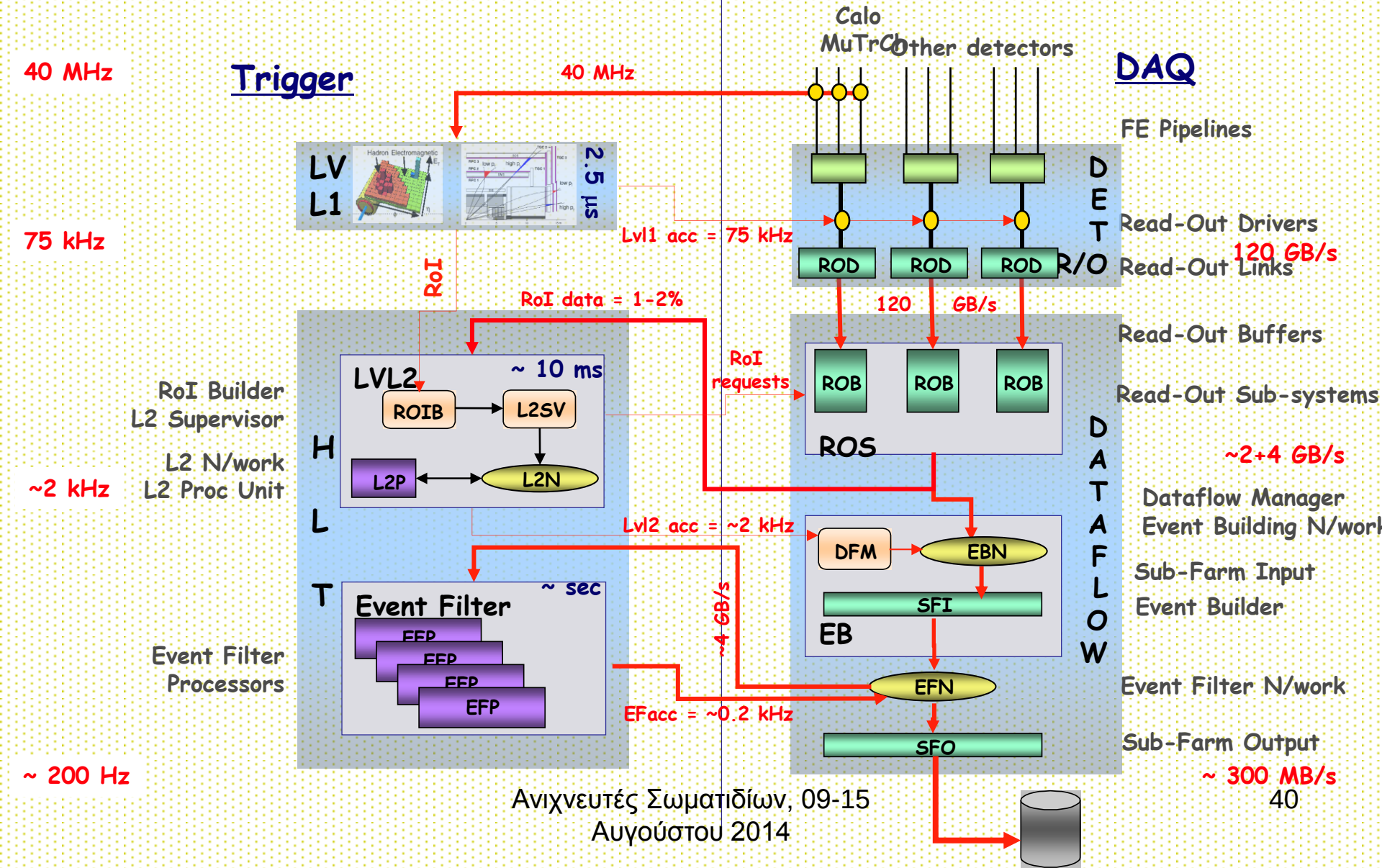
ATLAS: εγκατάσταση υποδομής

Πλήρης κρυογενικός σταθμός



Υπόγεια κοιλότητα υποδοχής του ανιχνευτή 2003

ATLAS: Σκανδαλισμός, Λήψη Δεδομένων και Σύστημα αυτομάτου ελέγχου



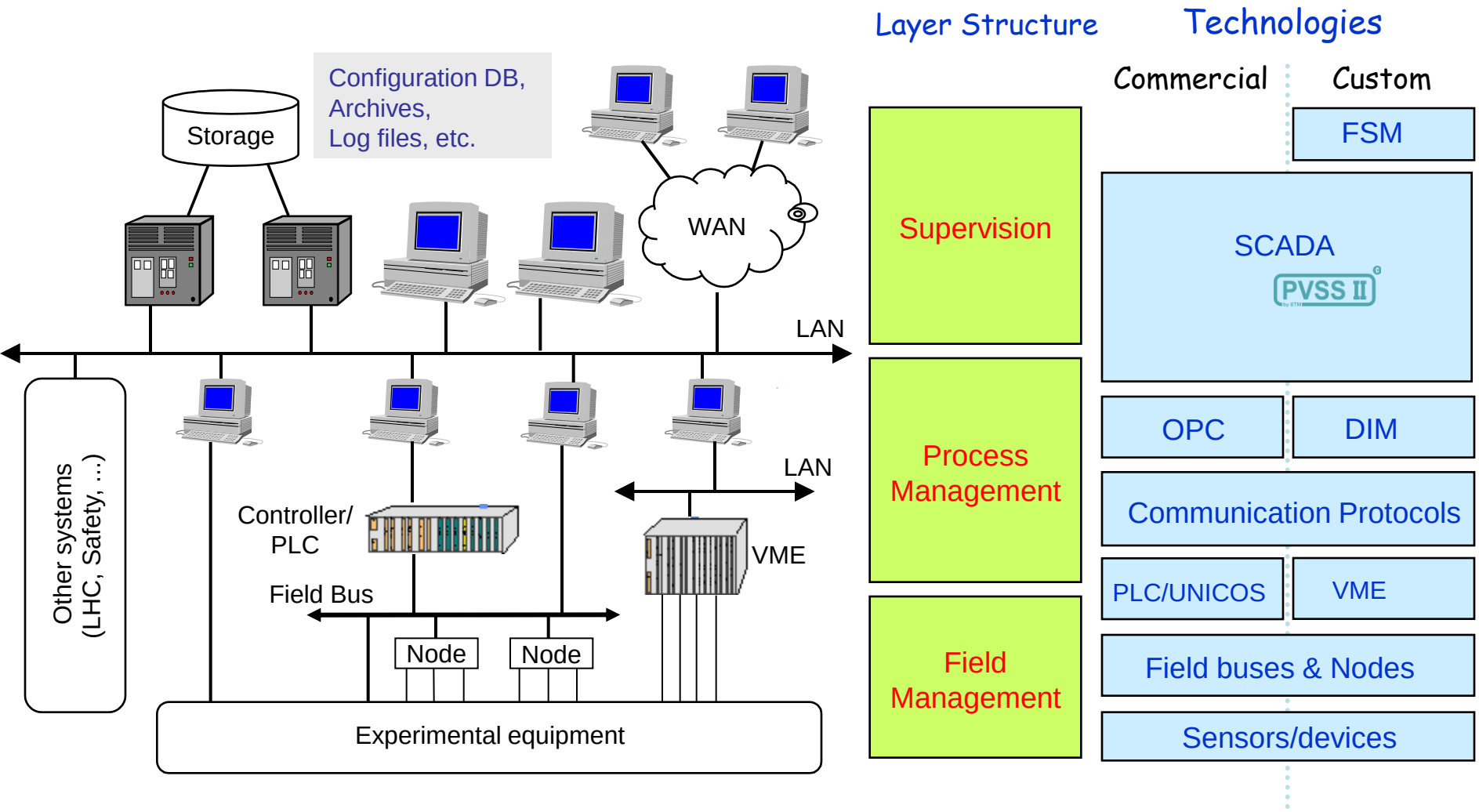
Σκανδαλισμός & Λήψη Δεδομένων

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



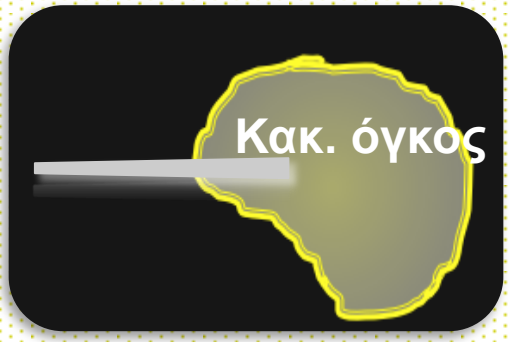
Based on an original idea from LHCb

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

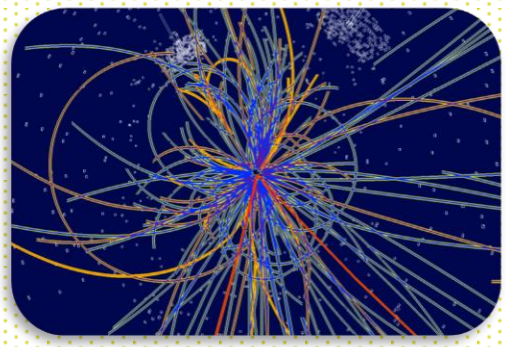
Εφαρμογές ΦΥΕ

Επιταχυντές Σωματιδίων



Θεραπεία πρωτονίων

Ανίχευση σωματιδίου, Ανακατασκευή τροχιάς



Απεικόνιση

Υπολογιστική ισχύς

Ανάλυση, Προσομειώσεις