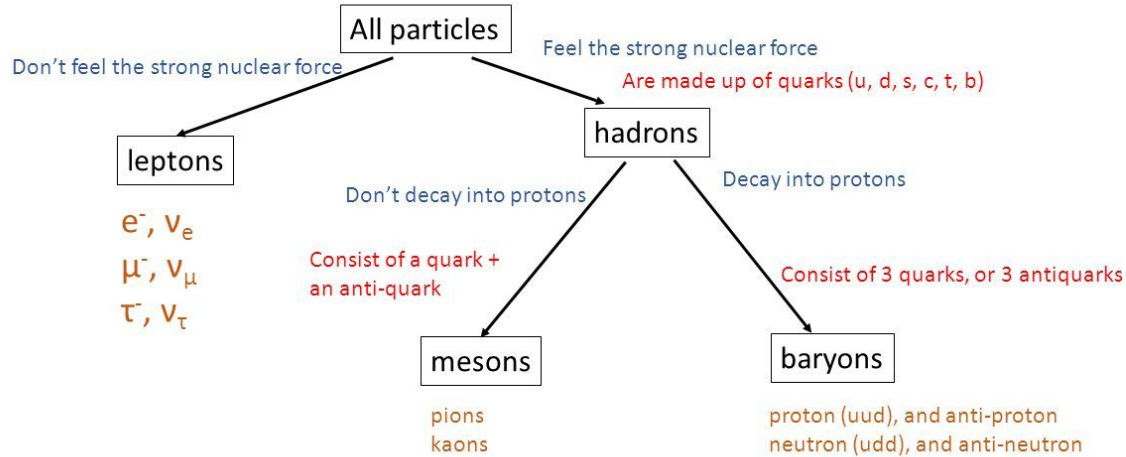


Εισαγωγή στους Ανιχνευτές

Στέλλα Ορφανέλλη
EP-CMX-DI
CERN 7.5.2024

Ομάδες Σωματιδίων



Ποια σωματίδια ανιχνεύουμε;

Φορτισμένα Σωματίδια

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

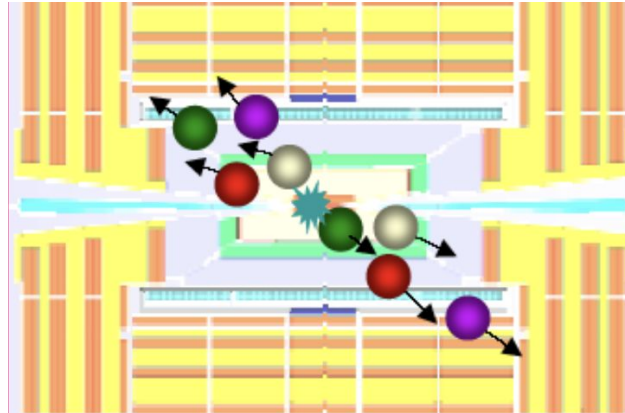
Ουδέτερα Σωματίδια

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

Ένας ανιχνευτής καταγράφει την παρουσία σωματιδίων.

Ιδανικά, θα έπρεπε να καταγράφει όλα τα σωματίδια που τον διαπερνούν, τις ιδιότητες τους και τη χρονική στιγμή ανίχνευσης με ακρίβεια.

- Ερμητικό: κάλυψη όλης της στερεάς γωνίας, χωρίς ρωγμές/κενά
- Μετρήσεις θέσης με ακρίβεια: υψηλό βαθμό κατάτμησης
- Μέτρηση ορμής και ενέργειας χωρίς σφάλμα
- Ανίχνευση, καταγραφή τροχιάς και ταυτοποίηση των σωματιδίων (μάζα, φορτίο)



Πώς ανιχνεύονται τα σωματίδια;

Τα σωματίδια καθώς διαπερνούν την ύλη αφήνουν την υπογραφή τους ή έστω κάποιο στοιχείο της ταυτότητας τους...

Μέσω της αλληλεπίδρασής τους με τα άτομα του υλικού του ανιχνευτή δημιουργώντας ηλεκτρικό σήμα ή φως.

Ποιες ιδιότητες των σωματιδίων μπορούμε να μετρήσουμε;

- ορμή
- φορτίο
- ενέργεια
- χρόνο ζωής

Με αυτές τις πληροφορίες γίνεται δυνατή η ταυτοποίηση του σωματιδίου. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας την ενέργεια και την ορμή μπορούμε να υπολογίσουμε και τη μάζα.

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



Κύριες αλληλεπιδράσεις σωματιδίων - ύλης

Ηλεκτρομαγνητικές :

- ❖ Διέγερση
- ❖ Ιονισμός
- ❖ Σκέδαση
- ❖ Ακτινοβολία Πέδησης (Bremsstrahlung)
- ❖ Δίδυμη γένεση
- ❖ Cherenkov Radiation

Αδρονικές :

- ❖ Αλληλεπιδράσεις με τον πυρήνα δημιουργούν δευτερογενή σωματίδια

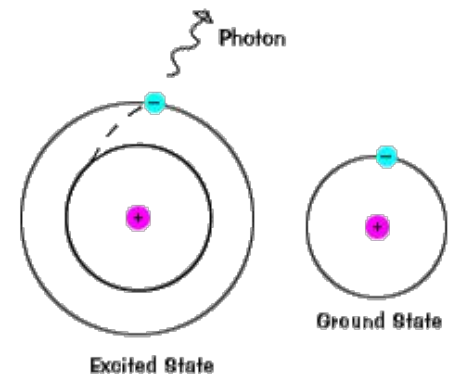
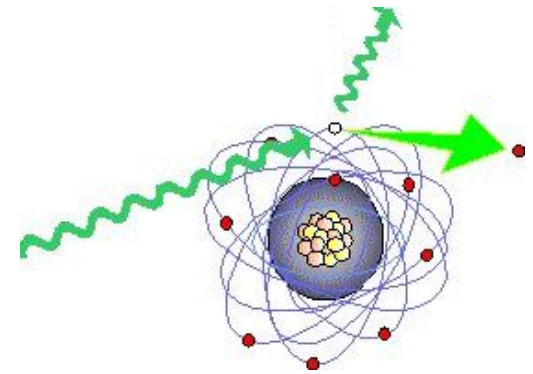
Απώλεια ενέργειας μέσω ιονισμού και διέγερσης

Ένα φορτισμένο σωματίδιο αλληλεπιδρά κυρίως με τα ηλεκτρόνια του ατόμου του ανιχνευτικού υλικού.

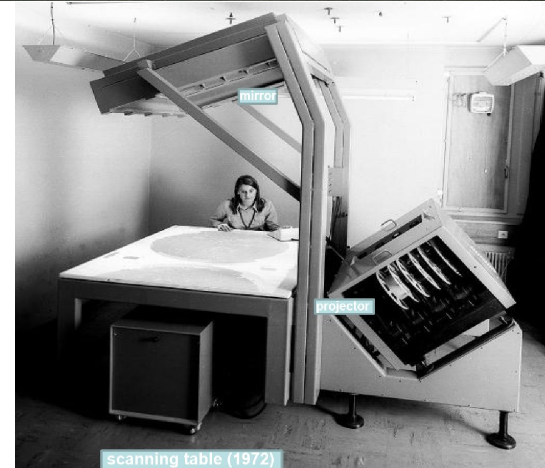
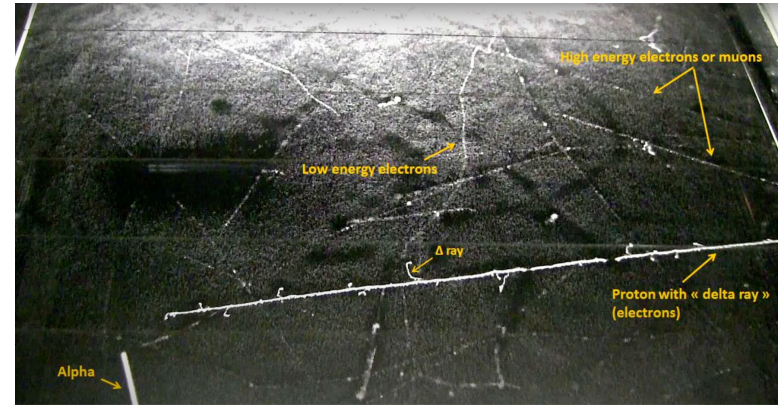
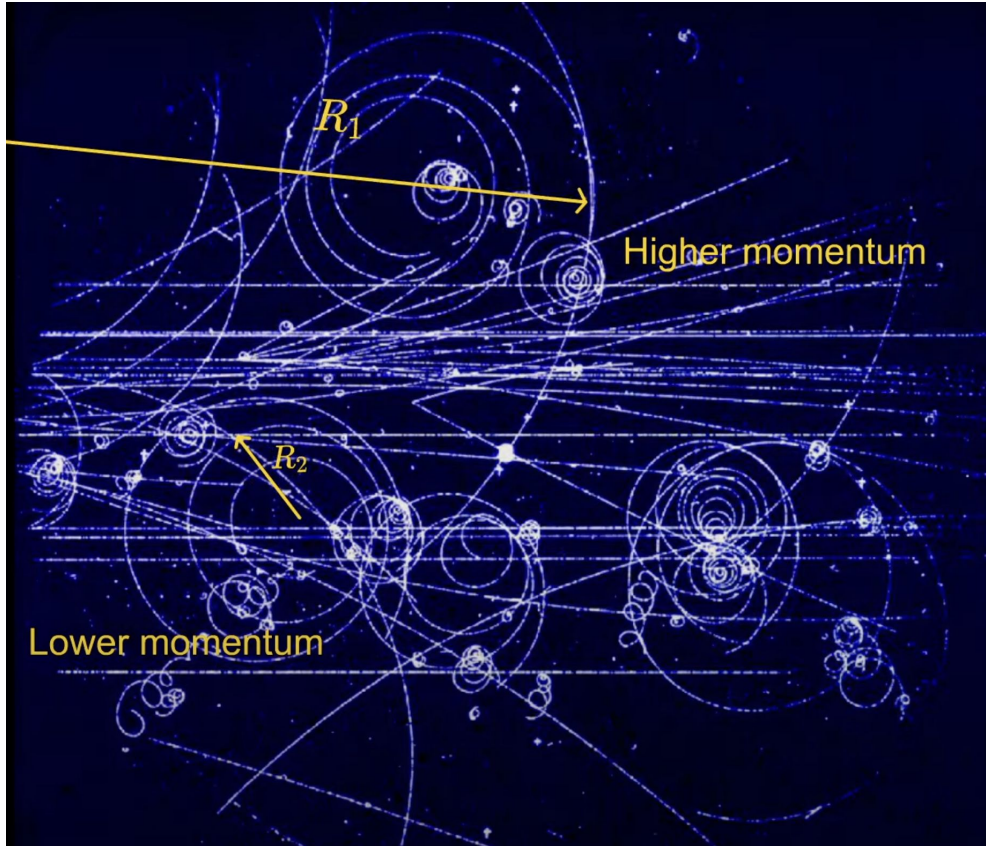
Δύο είδη 'σύγκρουσης':

Σκληρή Σύγκρουση: Προκαλεί **ΙΟΝΙΣΜΟ** του ατόμου δλδ ένα ηλεκτρόνιο απομακρύνεται από την περιοχή του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα. Μερικές φορές, το ηλεκτρόνιο αυτό είναι ικανό να προκαλέσει το ίδιο έναν δευτερεύοντα ιονισμό (δ-ray).

Απαλή Σύγκρουση: Προκαλεί **ΔΙΕΓΕΡΣΗ** του ατόμου δλδ ένα ηλεκτρόνιο μεταβαίνει από μία τροχιά χαμηλής ενέργειας σε μια άλλη τροχιά υψηλότερης ενέργειας. Τα διεγερμένα states είναι ασταθή. Το άτομο θα επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση με την αποδιέγερση του ηλεκτρονίου. Κατά την αποδιέγερση του ατόμου εκπέμπεται φωτόνιο. Όταν αυτό είναι στο ορατό φάσμα, το ονομάζουμε **σπινθηρισμό**.



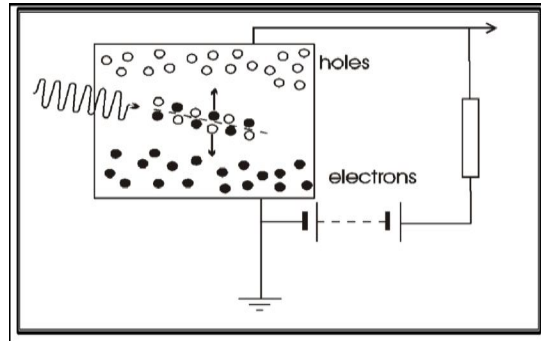
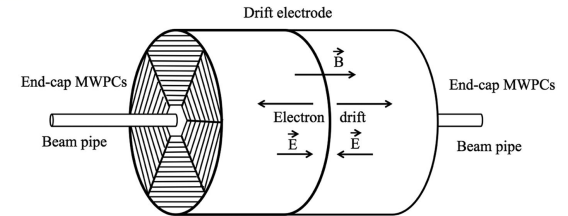
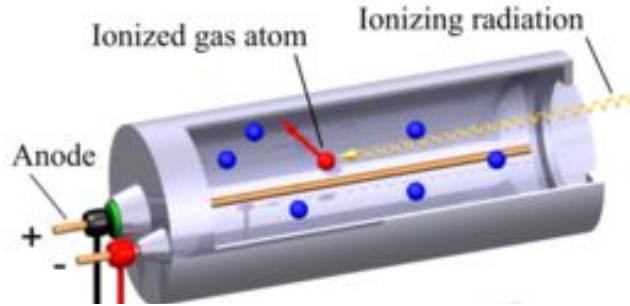
Παραδείγματα



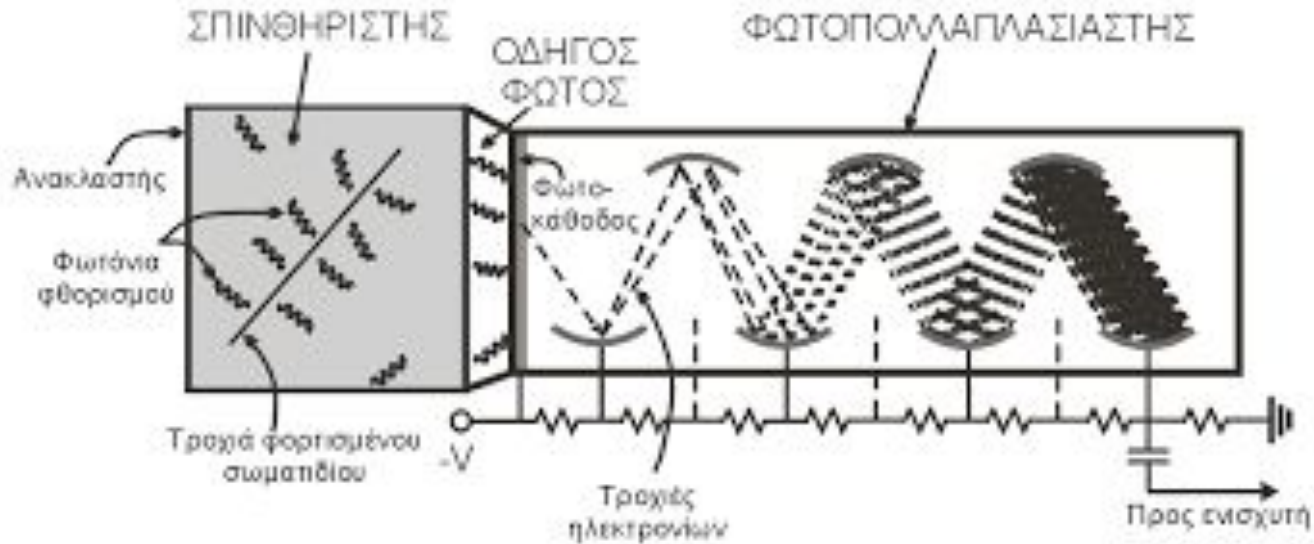
Παραδείγματα

Ανιχνευτές Ιονισμού:

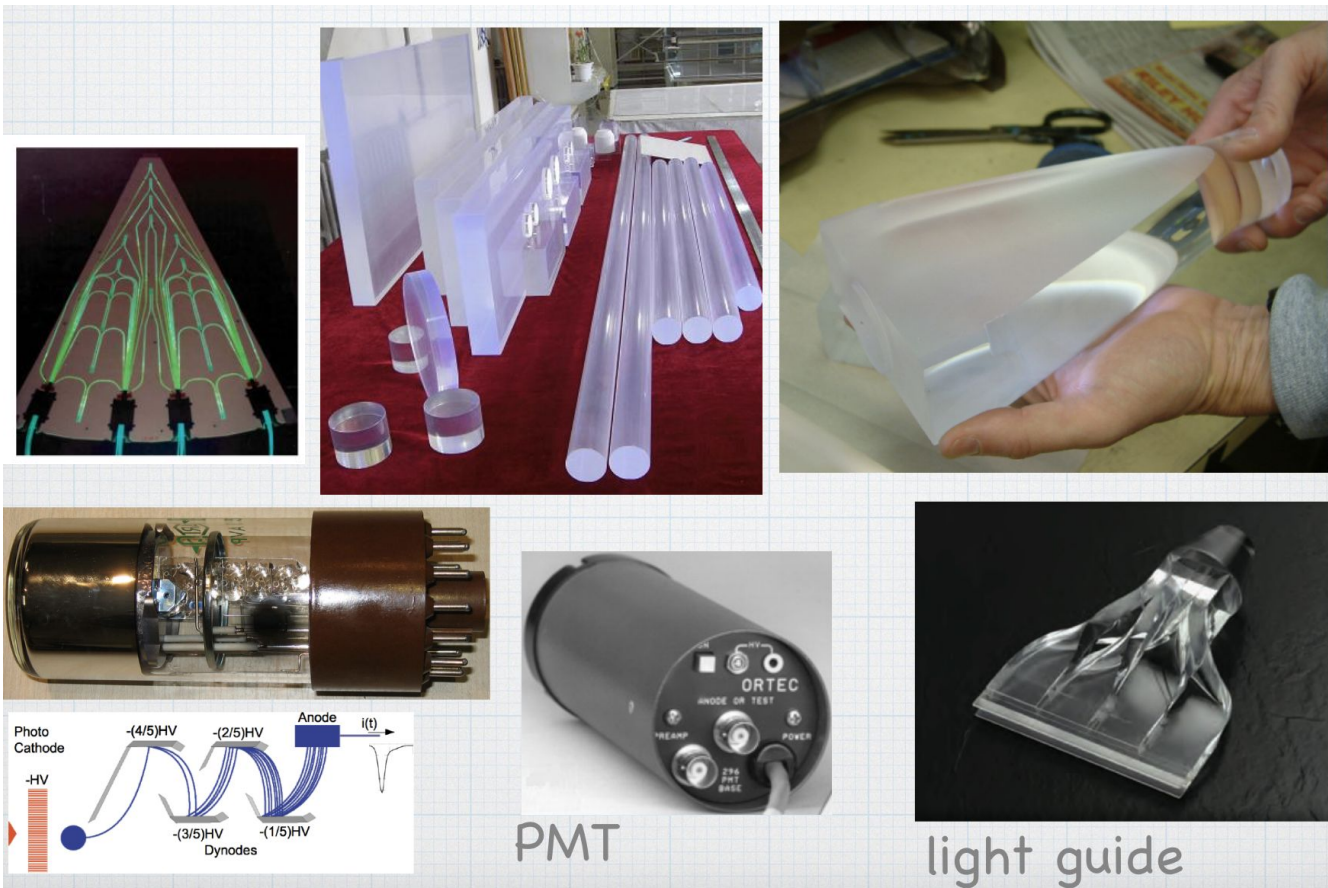
- ❖ Geiger-Müller counter
- ❖ MultiWire Proportional Chamber
- ❖ Time Projection Chamber
- ❖ Silicon detectors



Κλασική διάταξη σπινθηριστή



Σπινθηριστές, φωτοπολλαπλασιαστές, κυματοδηγοί

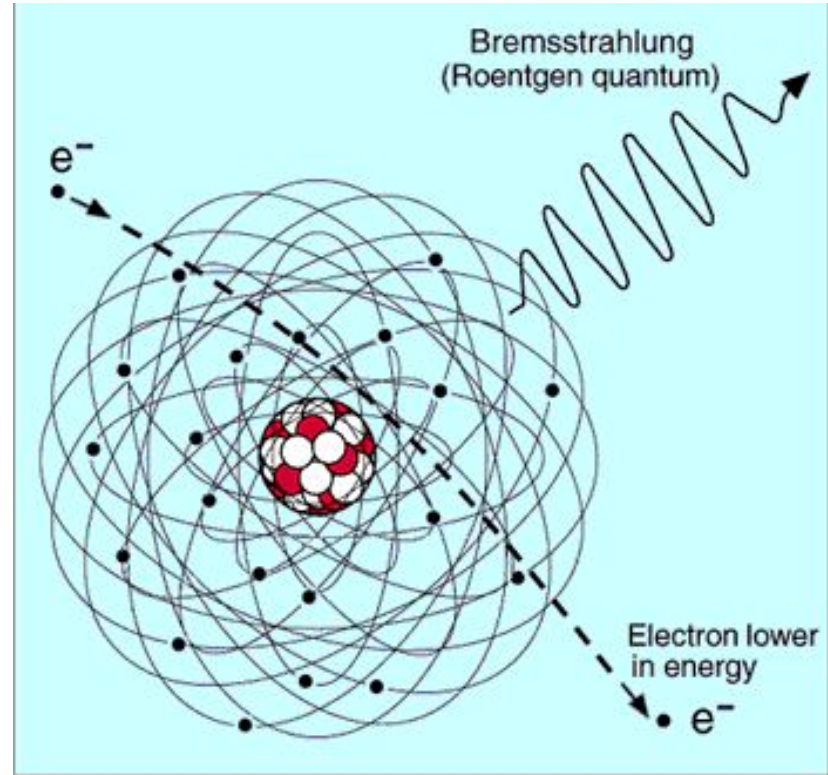


PMT

light guide

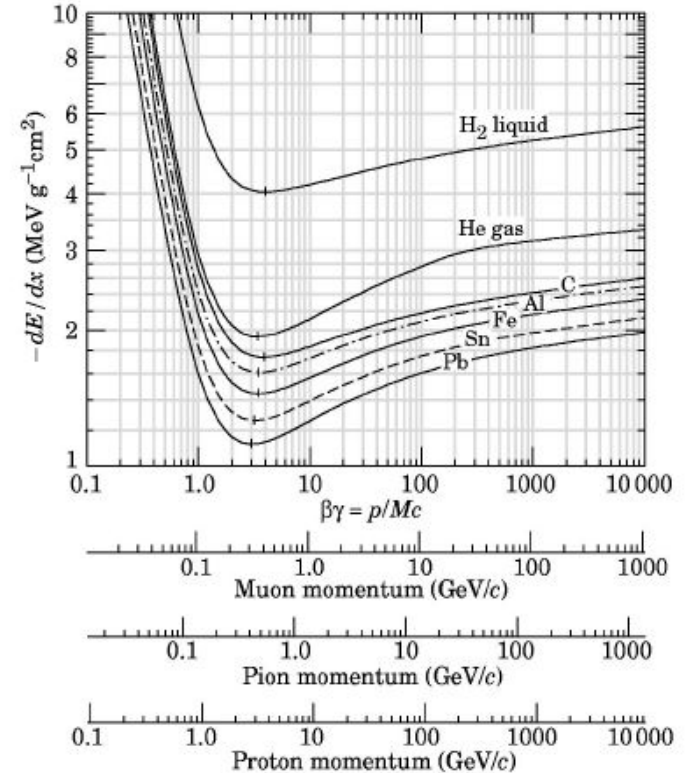
Απώλεια ενέργειας μέσω ακτινοβολίας πέδησης (Bremsstrahlung)

- ❖ Σκέδαση φορτισμένου σωματιδίου από τον πυρήνα του ατόμου και συνεπώς αλλαγή επιτάχυνσης του
- ❖ Προκαλείται απώλεια ενέργειας συνοδευόμενη από εκπομπή φωτονίου ενέργειας ίσης με αυτή που έχασε το σωματίδιο.



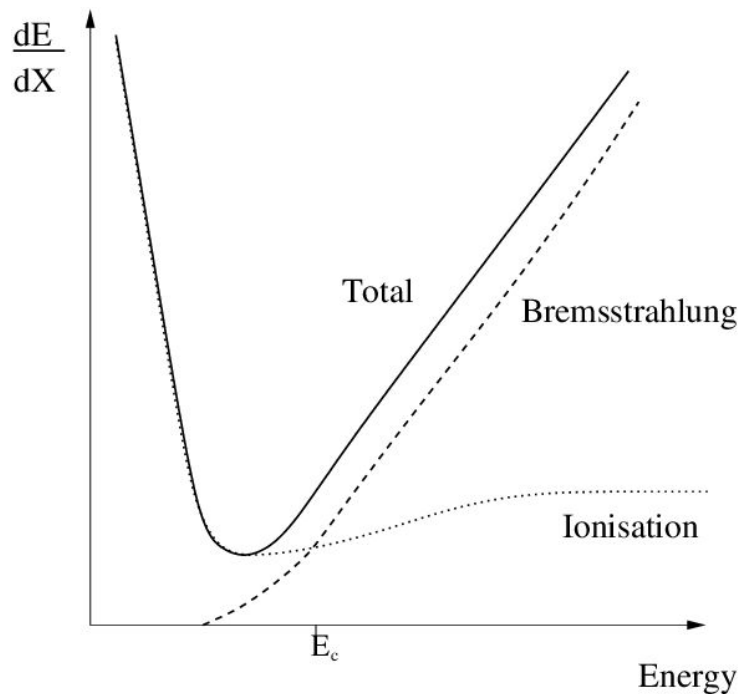
Ρυθμός απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους

- ❖ Γενικά, μικρή απώλεια ενέργειας ανά σύγκρουση αλλά πολλές συγκρούσεις στα πυκνά υλικά.
 - **Χρήσιμη ποσότητα: ΜΕΣΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ του σωματιδίου ανά μονάδα μήκους.**
- ❖ Η μαθηματική περιγραφή της απώλειας ενέργειας έχει γίνει με πολύ καλή ακρίβεια από την σχέση Bethe-Bloch για διάφορα υλικά και σωματίδια.
- ❖ **Η απώλεια ενέργειας εξαρτάται από το υλικό αλλά και από την ενέργεια και το είδος του σωματιδίου.**
- ❖ Η απώλεια ενέργειας κατά μήκος της διαδρομής ενός φορτισμένου σωματιδίου μεταβάλλεται σημαντικά και γίνεται υψηλή στις μικρότερες ενέργειες.



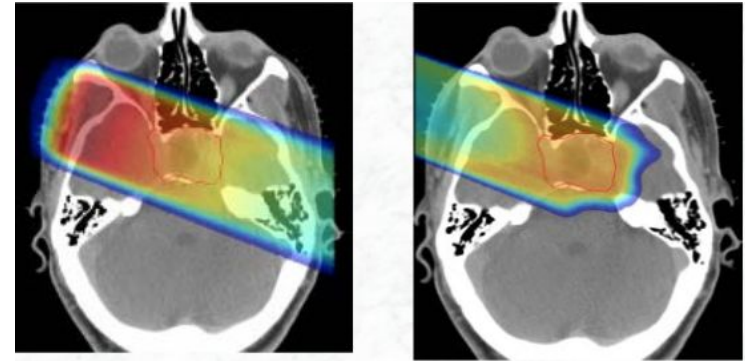
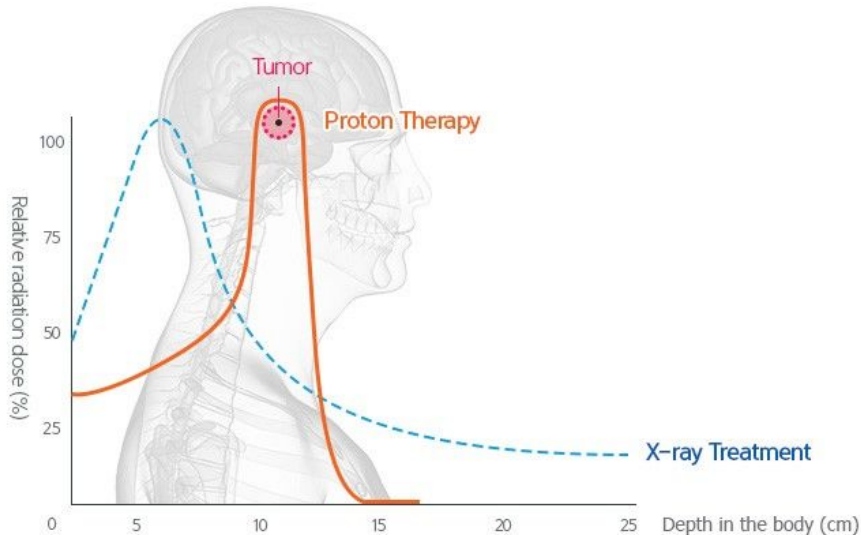
Ρυθμός απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους:

- ❖ λόγω ιονισμού και διεγέρσεων σε χαμηλές ενέργειες
- ❖ λόγω ακτινοβολίας Πέδησης (Bremsstrahlung) σε υψηλές ενέργειες (αφορά κυρίως e^+ -)



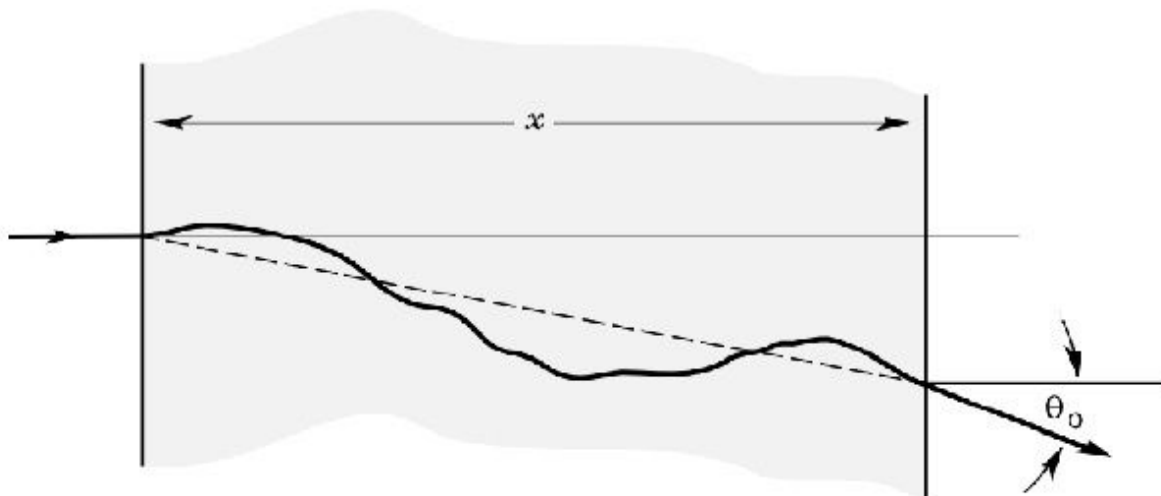
Ένα παράδειγμα: αδρονοθεραπεία & Bragg peak

- ❖ Λόγω των διαδικασιών αλληλεπίδρασης τα σωματίδια χάνουν ενέργεια στην ύλη και τελικά θα σταματήσουν.
- ❖ Η απώλεια ενέργειας μέσω dE/dx (απώλεια ιονισμού) εξαρτάται από την ταχύτητα και επομένως για ένα δεδομένο σωματίδιο εξαρτάται από το μήκος διείσδυσης στο μέσο.
- ❖ **Καμπύλη Bragg:** απώλεια ενέργειας - ή δόση ακτινοβολίας μέσω εναποτιθέμενης ενέργειας - ως συνάρτηση του μήκους διαδρομής (βάθος x) στο μέσο



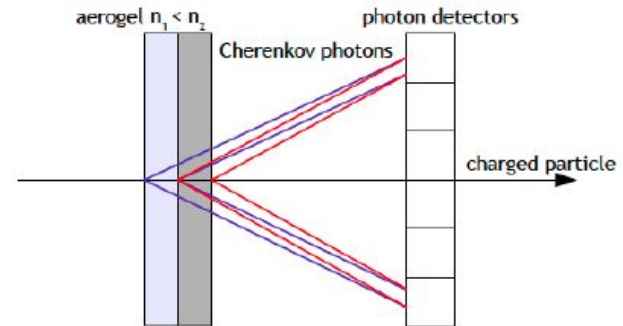
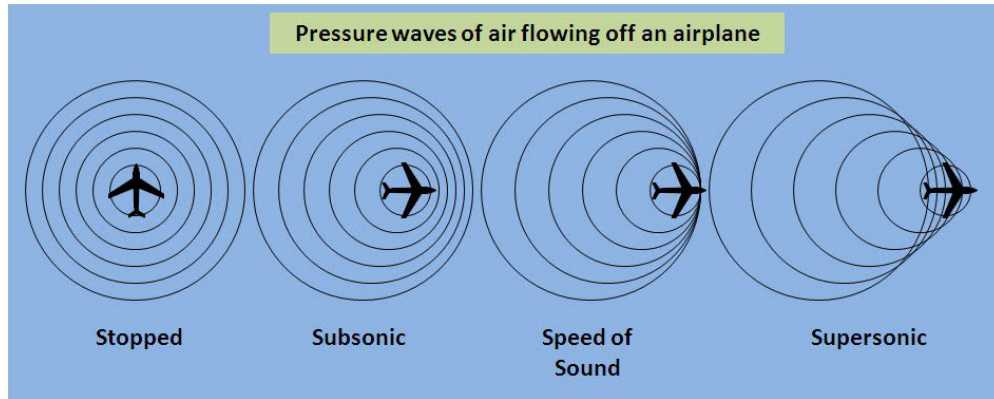
Σκέδαση: ΜΗ ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΑΛΛΑ ΑΝΑΠΟΦΕΥΚΤΗ

- ❖ Ένα φορτισμένο σωματίο στη διέλευσή του από τον ανιχνευτή υφίσταται πολλές γωνιακές αποκλίσεις της τροχιάς του λόγω των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων με τους πυρήνες του υλικού.
- ❖ Πιθανότητα σκέδασης σε γωνία θ μετά από απόσταση x στο υλικό έχει γκαουσιανή μορφή και εξαρτάται από το μήκος ακτινοβολίας



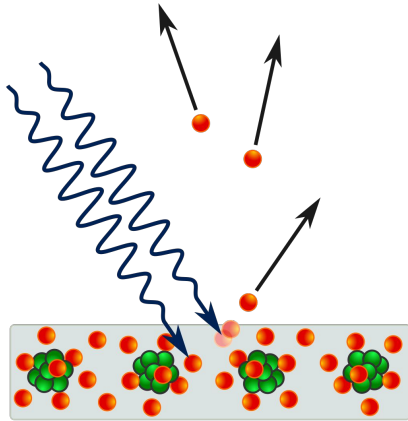
Cherenkov radiation: ΜΠΛΕ ΦΩΣ

- ❖ Αν ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται σε ένα υλικό με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του φωτός στο υλικό τότε έχουμε ακτινοβολία Cherenkov.
- ❖ Με χρήση ανιχνευτών αναγνωρίζουμε το σωματίδιο από την ακτίνα των κύκλων

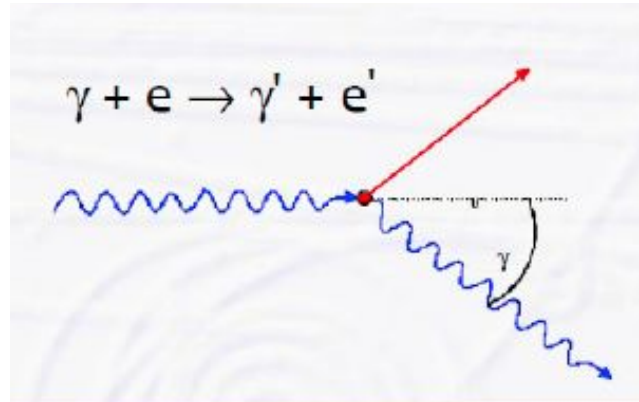


Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη

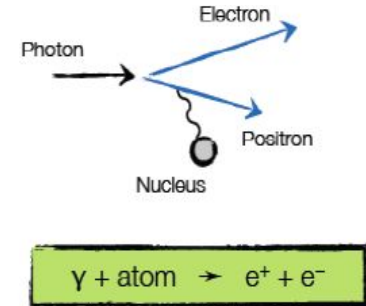
- ▶ **Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο:**
Η προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στα αριστερά εξαγεί ηλεκτρόνια από την επιφάνεια του μετάλλου δεξιά. Χρησιμοποιείται στους φωτοανιχνευτές.



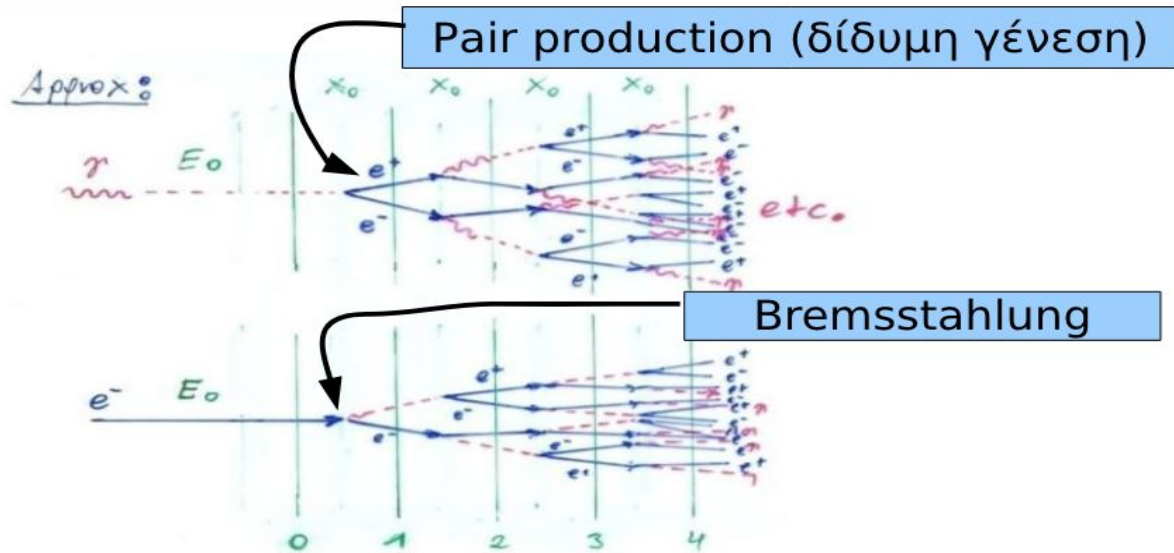
- ▶ **Σκέδαση Compton:**
Φωτόνιο μήκους κύματος λ σκεδάζεται και ένα νέο φωτόνιο μήκους κύματος λ' φεύγει με γωνία θ ως προς την ευθεία που ορίζει η αρχική διεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης φωτονίων. Μη επιθυμητή αλλά αναποφεύκτη.



- ▶ **Δίδυμη γένεση:**
Αν $E_{\text{φωτονίου}}$ υπερβαίνει το διπλάσιο της μάζας ηρεμίας του ηλεκτρονίου το φωτόνιο εξαφανίζεται και τη θέση του παίρνει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου. Χρήσιμη για έναρξη ΗΜ shower.

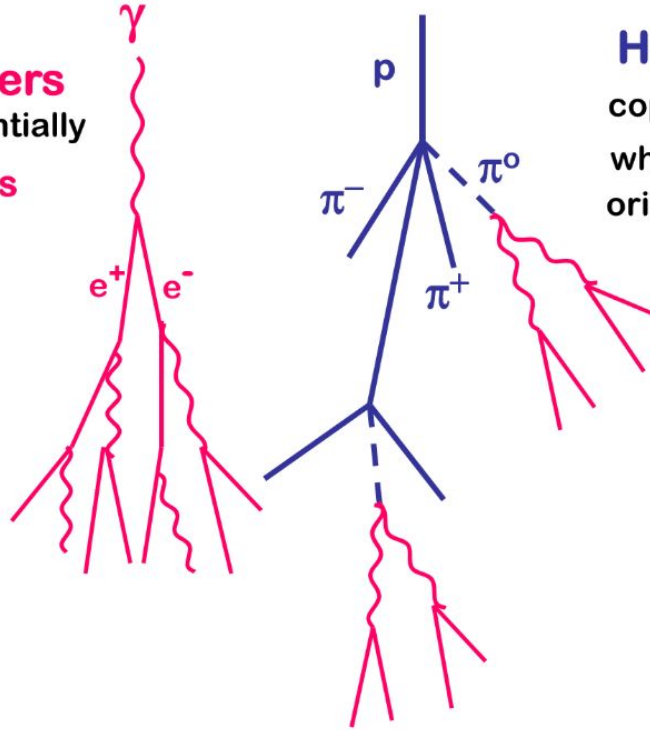


Ηλεκτρόνια και φωτόνια σε “πυκνή ύλη” - EM shower



EM showers vs Hadron cascades

EM showers
contain essentially
 e^\pm and γ 's



Hadron cascades
copiously produce π^0 's,
which generate $\gamma\gamma$ pairs,
originating **EM showers**

Σύνοψη

Θέλω ο ανιχνευτής

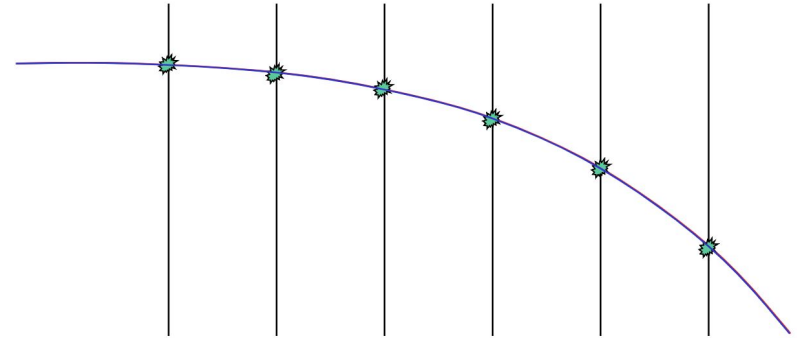
- ❖ ή να αλληλεπιδράσει ελάχιστα με το σωματίδιο ώστε να μου δώσει ένα σήμα χωρίς να μεταβάλλει τις ιδιότητες του οπότε χρειάζεται πολύ ελαφριά υλικά
- ❖ ή να αλληλεπιδράσει έντονα με το σωματίδιο και να το σταματήσει και να μετρήσει την ενέργεια του οπότε χρειάζεται πυκνά υλικά

Το σήμα μου τελικά θα είναι πάντα ηλεκτρικό.

Είτε έρχεται από ιονισμό, Bremsstrahlung, Δίδυμη γένεση οπότε το αρχικό σήμα είναι ηλεκτρικό
Είτε έρχεται από φως από σπινθηρισμό, Cherenkov το οποίο ανιχνεύεται από φωτοανιχνευτές που στο τέλος παράγουν κι αυτοί ένα ηλεκτρικό σήμα.

Τροχιογράφοι/ Ιχνηλάτες

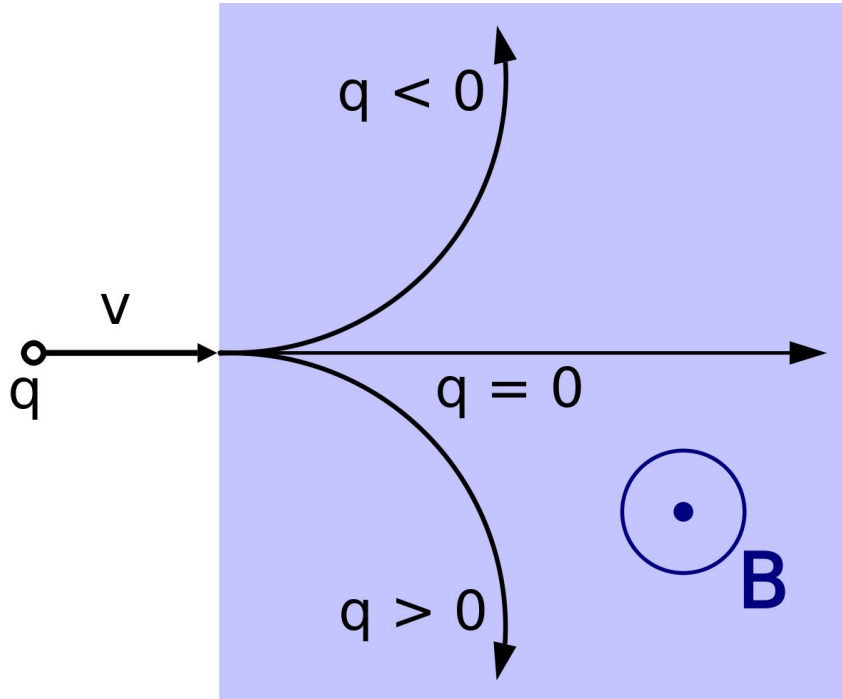
- ❖ **Θέλω ελάχιστο υλικό**
 - για να μην προκαλώ σκέδαση και να μην αλλάζω την πορεία του σωματιδίου
 - για να αποφύγω τη δημιουργία δευτερευόντων σωματιδίων.
- ❖ **Θέλω να είμαι κοντά στο σημείο σύγκρουσης και να είμαι ο πρώτος που θα δει τα σωματίδια (πριν αρχίσει το υλικό άλλων συστημάτων να αλληλεπιδρά μαζί του)**
 - **Πρέπει να αντέχει στην ακτινοβολία**
- ❖ **Πρέπει να έχω**
 - **πολλά ανιχνευτικά στοιχεία με πολύ μικρό μέγεθος** για να ανιχνεύω με ακρίβεια τη θέση απ' όπου πέρασε το σωματίδιο
 - **πολλά στρώματα** ώστε να μπορώ να ανακατασκευάσω την τροχιά
- ❖ **Παρουσία μαγνητικού πεδίου για φορτίο και ορμή**

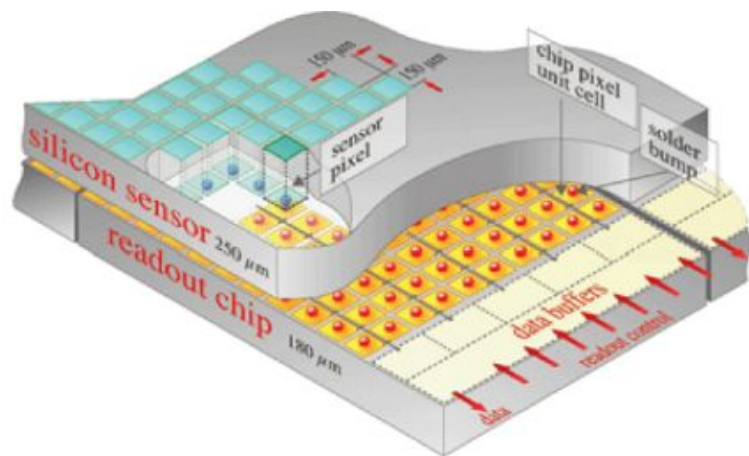
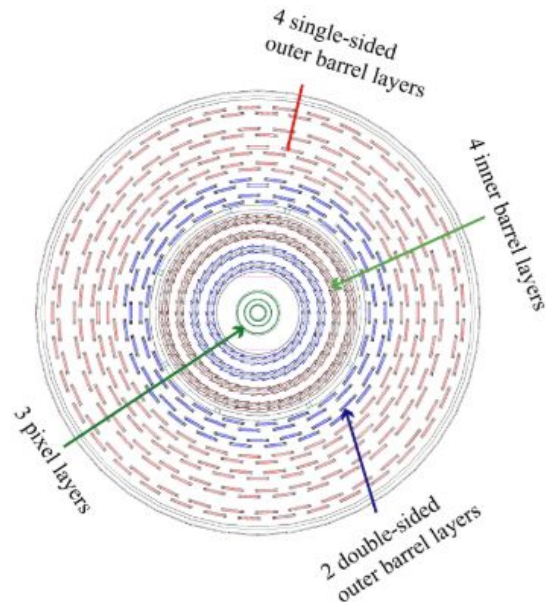


Multiple thin layers of, for example, silicon sensors

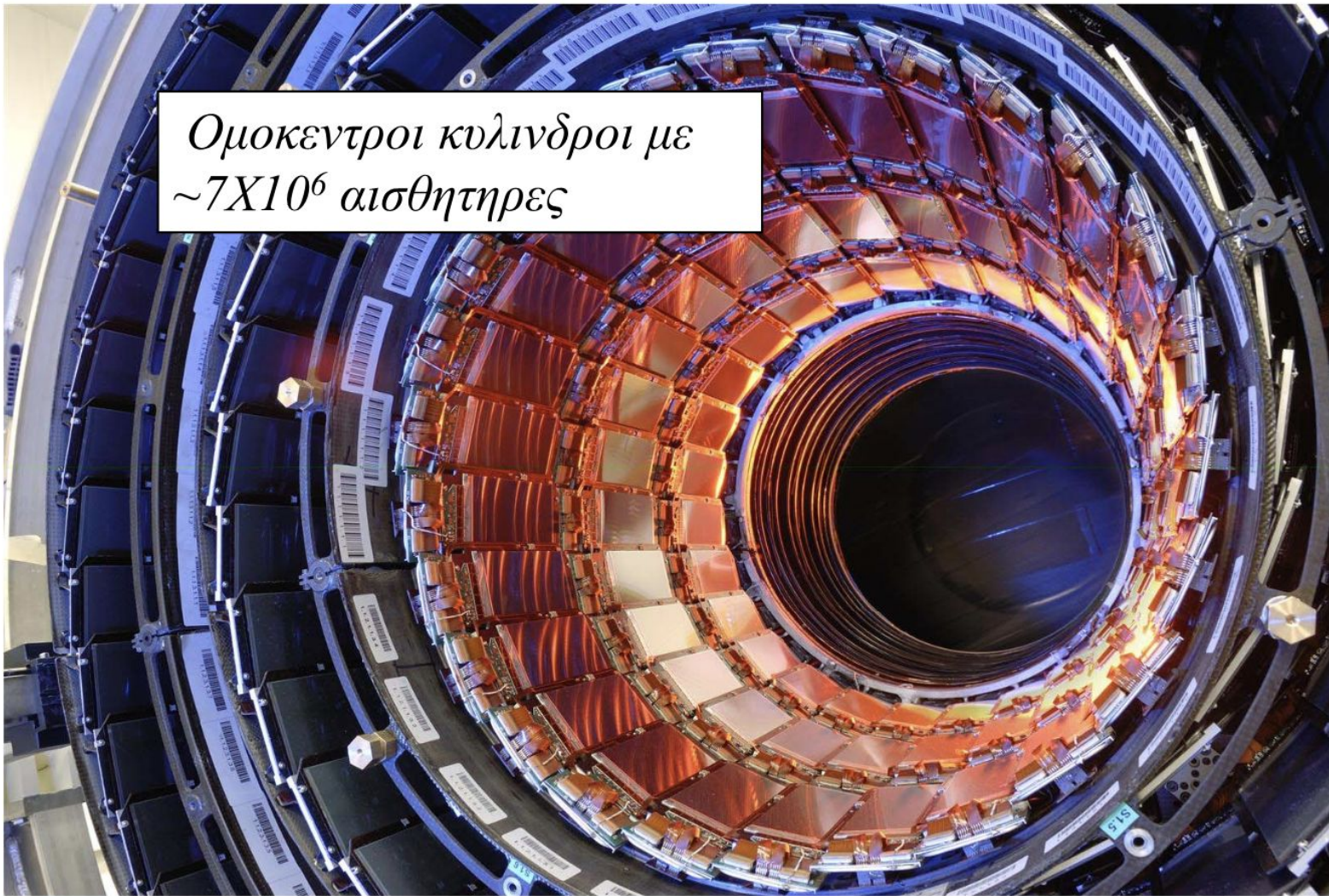
Χρήση μαγνητικού πεδίου για μέτρηση ορμής και φορτίου

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \text{ - Lorentz force}$$





Ομοκεντροι κυλινδροι με
 $\sim 7 \times 10^6$ αισθητηρες

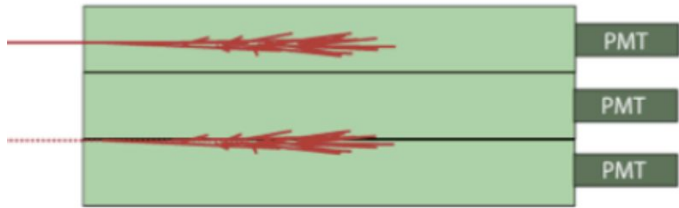


Καλορίμετρα

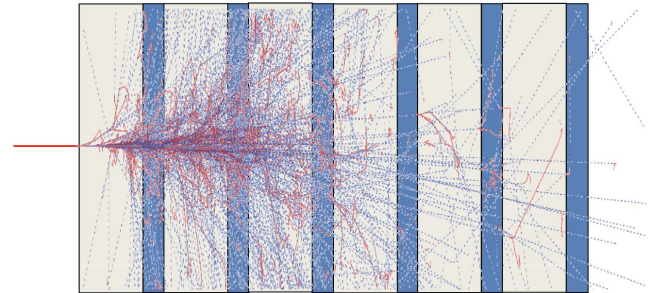
Θέλω να σταματήσω τα σωματίδια και να μετρήσω την ενέργεια τους.

Ο συνολικός αριθμός ζευγών ηλεκτρονίων-θετικών ιόντων ή φωτονίων μας δίνει την ενέργεια του σωματιδίου.

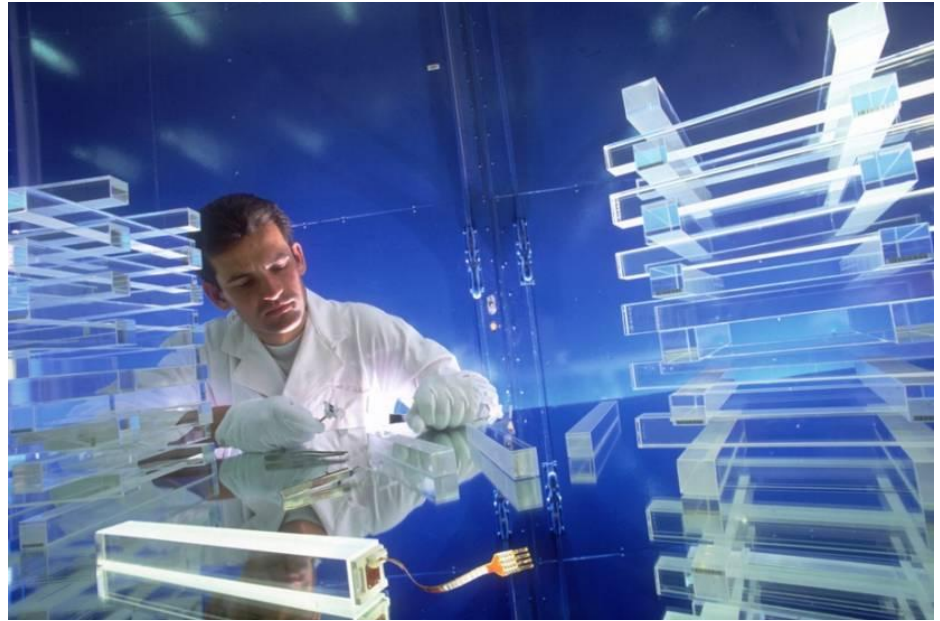
- Ηλεκτρομαγνητικά - για ενεργειακές μετρήσεις σωματιδίων που αλληλεπιδρούν ηλεκτρομαγνητικά (e^+ , e^- , φωτόνια)
- Αδρονικά - μετρούν την ενέργεια των αδρονίων (p, πιονια,καονια, jets, κτλ).



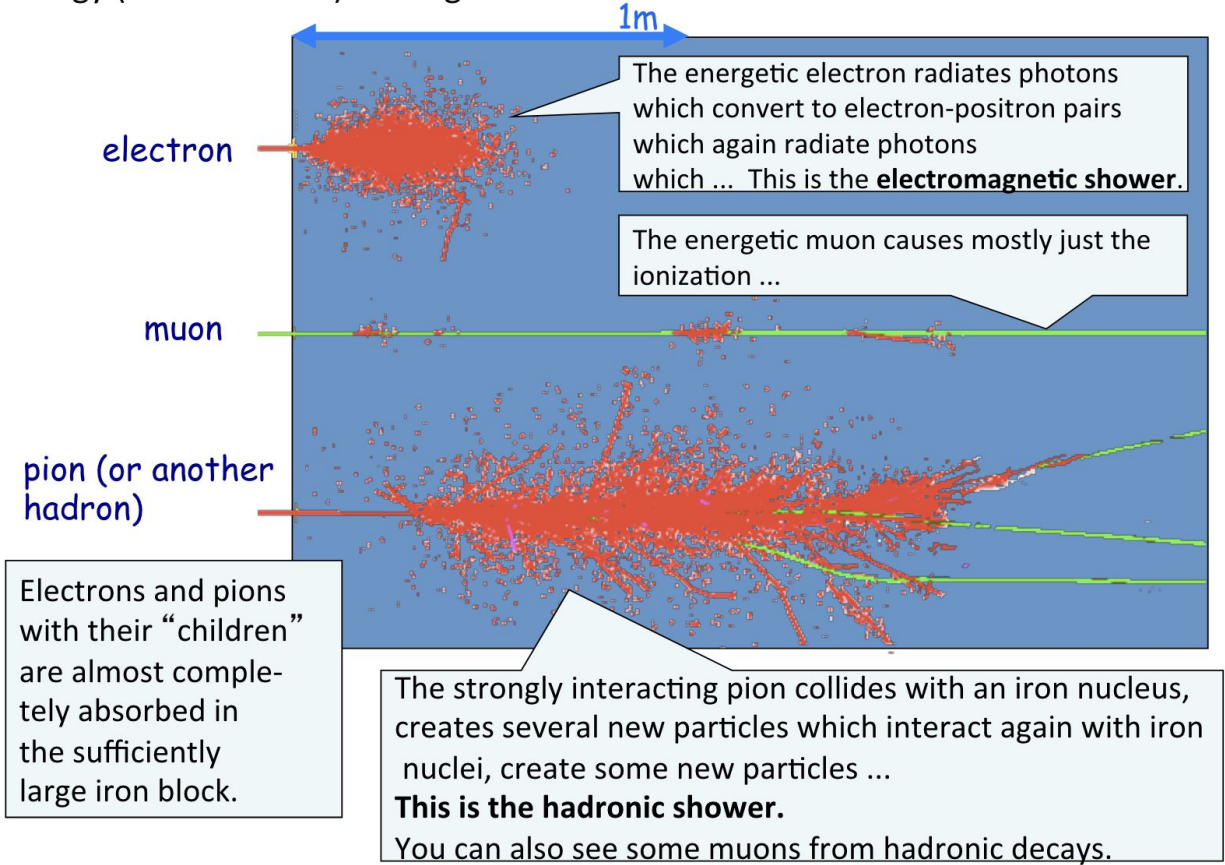
Ομογενές καλορίμετρο
-παράγει σήμα όλο το υλικό
Συνήθως ΗΜ.



Δειγματοληπτικό καλορίμετρο
-ενεργό υλικό που παράγει σήμα
-παθητικό υλικό που λειτουργεί ως απορροφέας
Συνήθως αδρονικό.

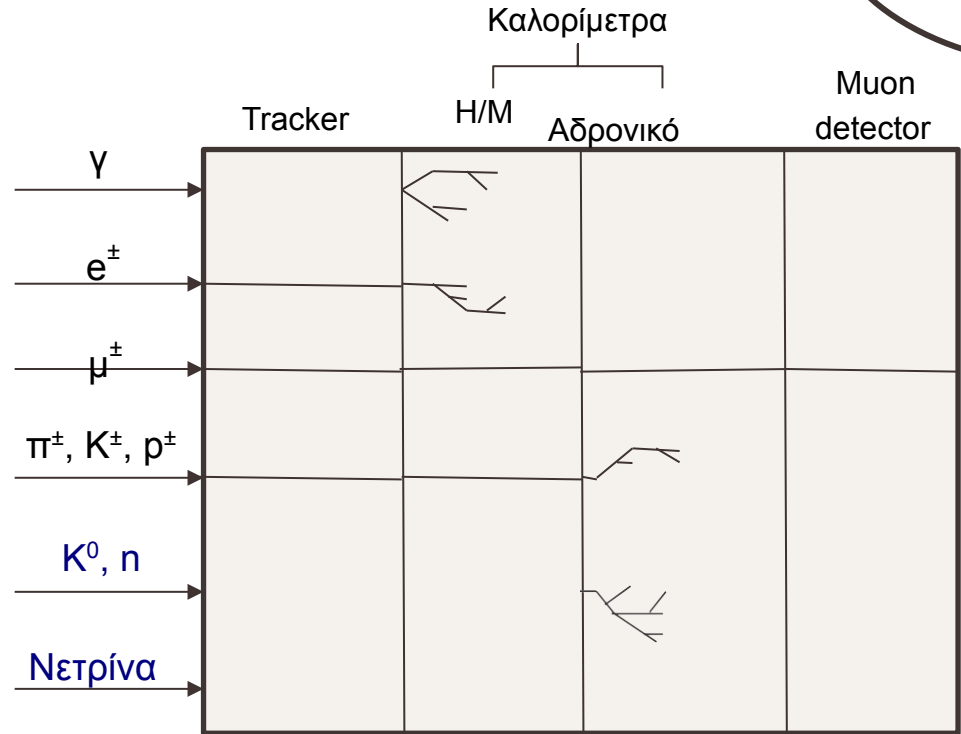


Let us have a look at interaction of different particles with the same high energy (here 300 GeV) in a big block of iron:



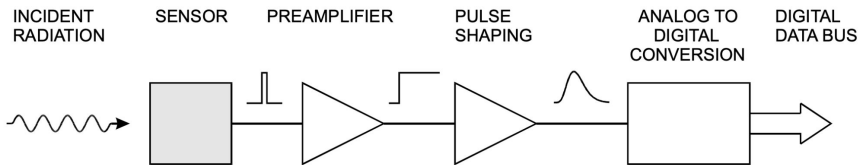
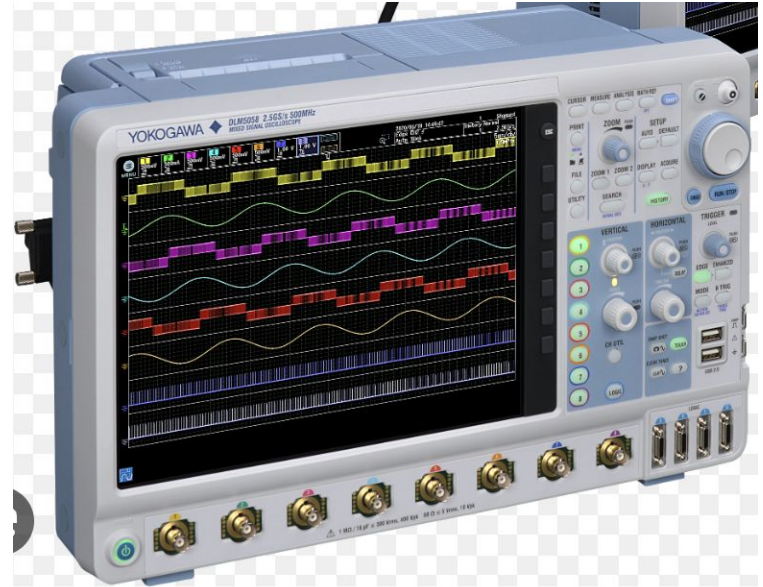
Σήματα σε έναν ανιχνευτή...

- ▶ γ : Δίδυμη γένεση
- ▶ e^\pm : Σήμα στον Tracker, ιονισμοί, Bremsstrahlung
- ▶ μ^\pm : Ιονισμοί, διαπερνά τον ανιχνευτή, σήμα στους επιμέρους ανιχνευτές
- ▶ π^\pm, K^\pm, p^\pm : Σήμα στον Tracker, shower, σταμάτημα στο αδρονικό καλορίμετρο
- ▶ K^0, n : Σήμα μόνο στο αδρονικό καλορίμετρο
- ▶ Νετρίνα : Καμία αλληλεπίδραση, διατήρηση ορμής και ενέργειας



Τι κάνουμε το σήμα;

- ❖ Το ηλεκτρικό σήμα
 - Ενισχύεται
 - Μορφοποιείται
 - Ψηφιοποιείται
 - Αποθηκεύεται προσωρινά (buffered)
 - Αποστέλλεται στο υπολογιστικό σύστημα μέσα σε ένα πακέτο δεδομένων

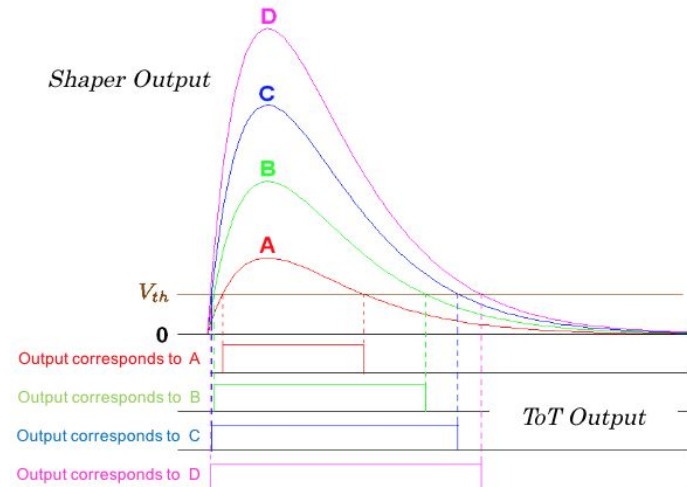
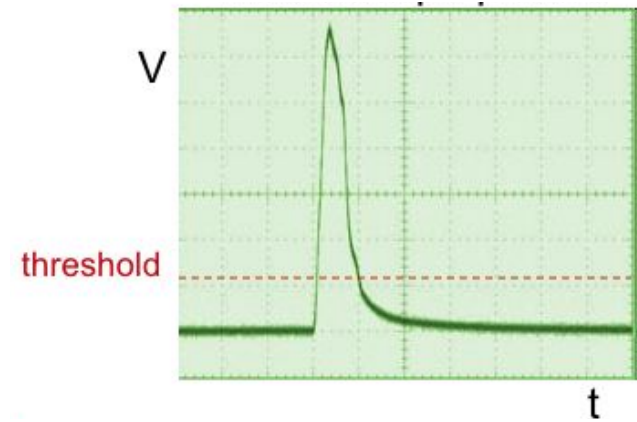


Μετρήσεις σήματος

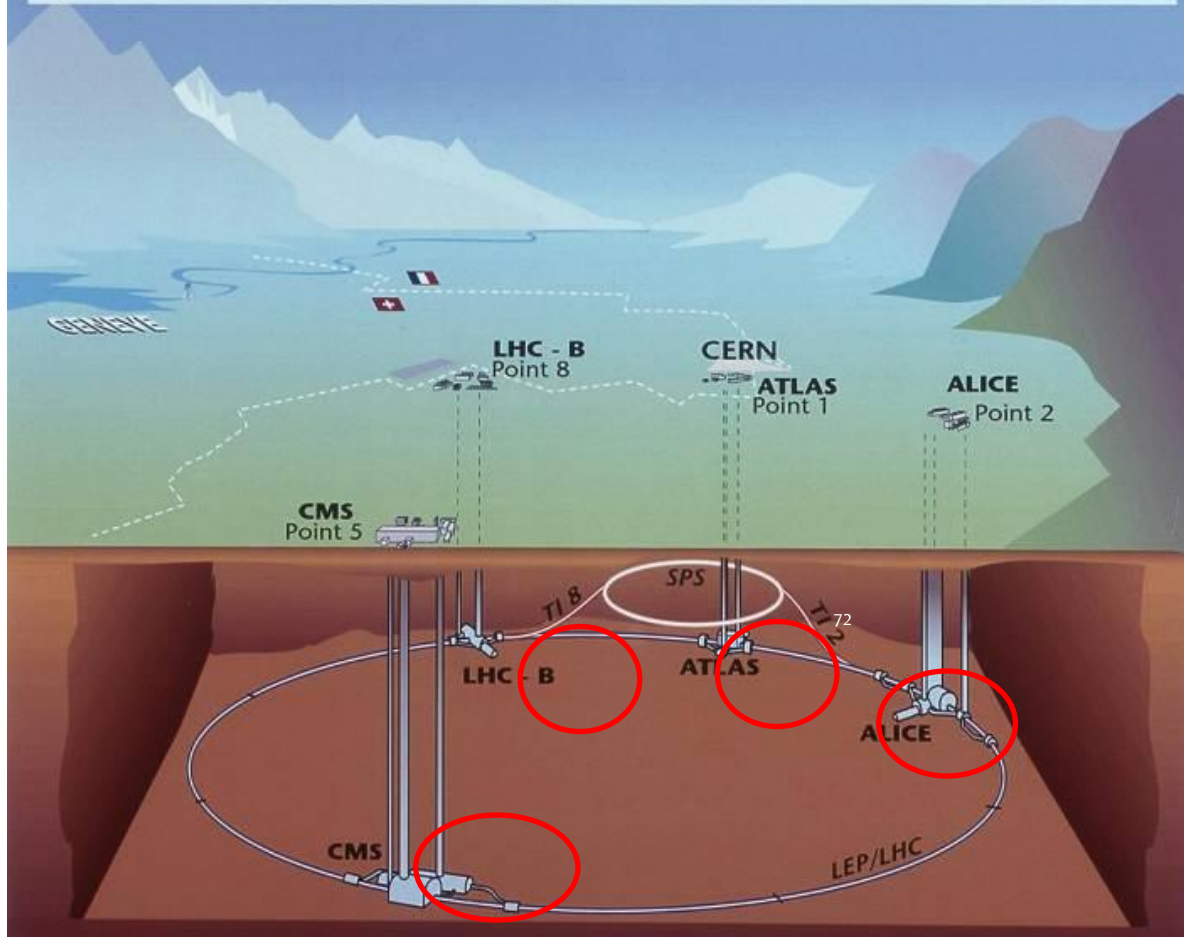
❖ Διάφορες μετρήσεις είναι δυνατές με ένα ηλεκτρικό σήμα.

- Δυαδικό σήμα: Πάνω/Κάτω από το κατώφλι (threshold)
- Χρόνος πάνω από κατώφλι (time over threshold T_{oT})
- Ολοκλήρωμα σήματος (φορτίο)
- Χρόνος άφιξης

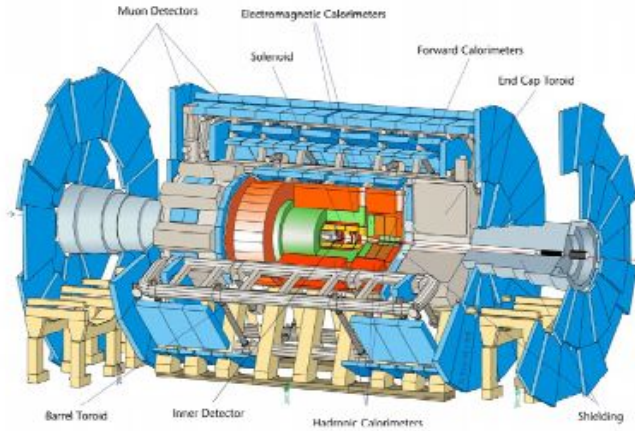
και πολλές άλλες...



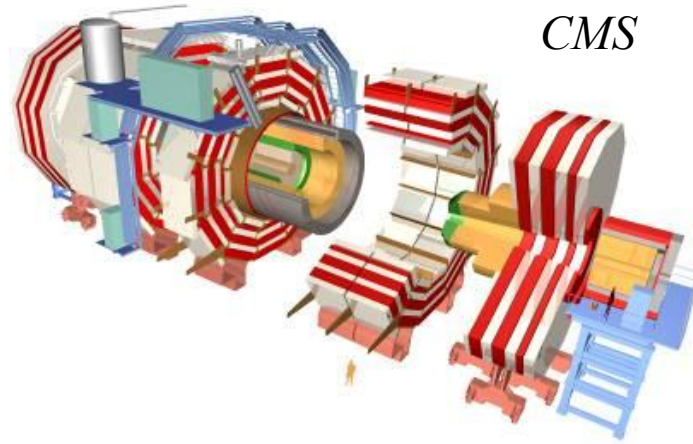
Overall view of the LHC experiments.



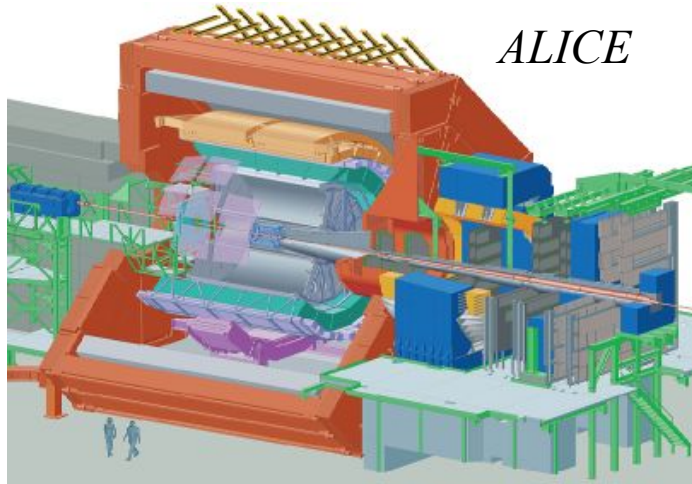
ATLAS



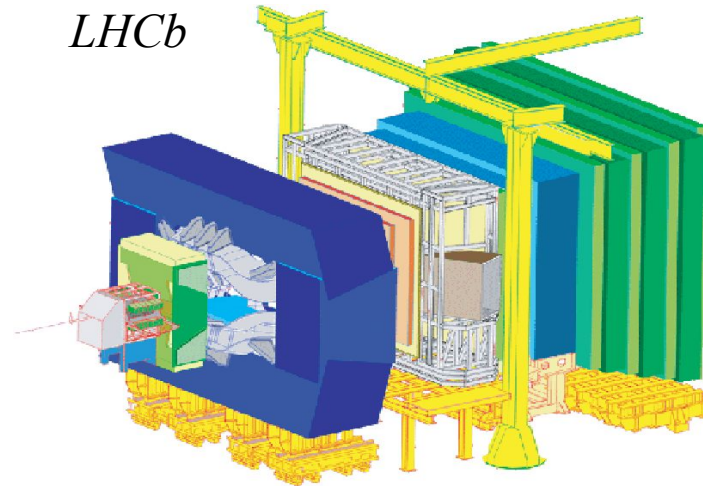
CMS



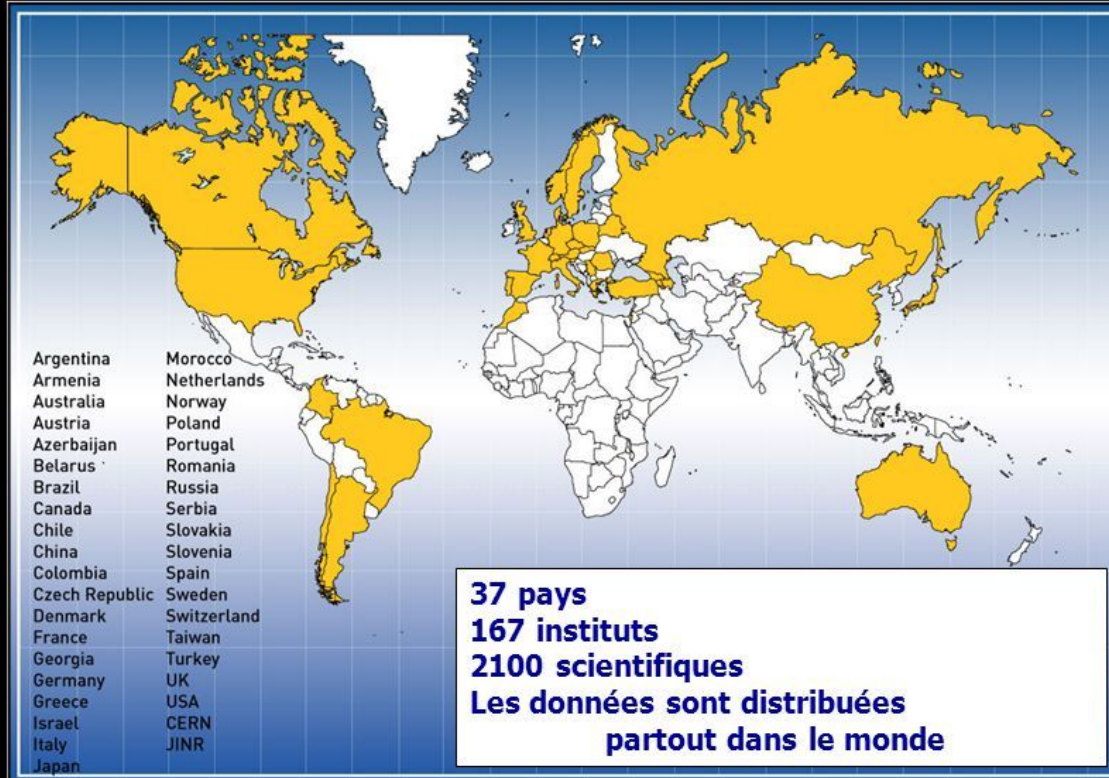
ALICE



LHCb



La collaboration ATLAS

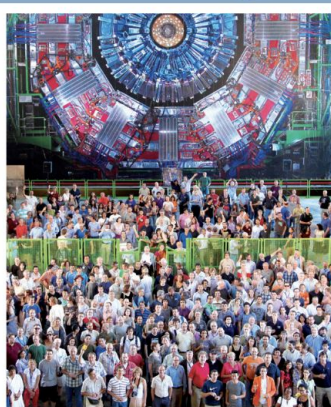


Ensemble, nous explorons la physique pour répondre aux questions



CMS

CMS stands for **Compact Muon Solenoid**: compact because it is “small” for its enormous weight, muon for one of the particles it detects, and solenoid for the coil that forms the basis of its huge superconducting magnet.



▼ Collaboration

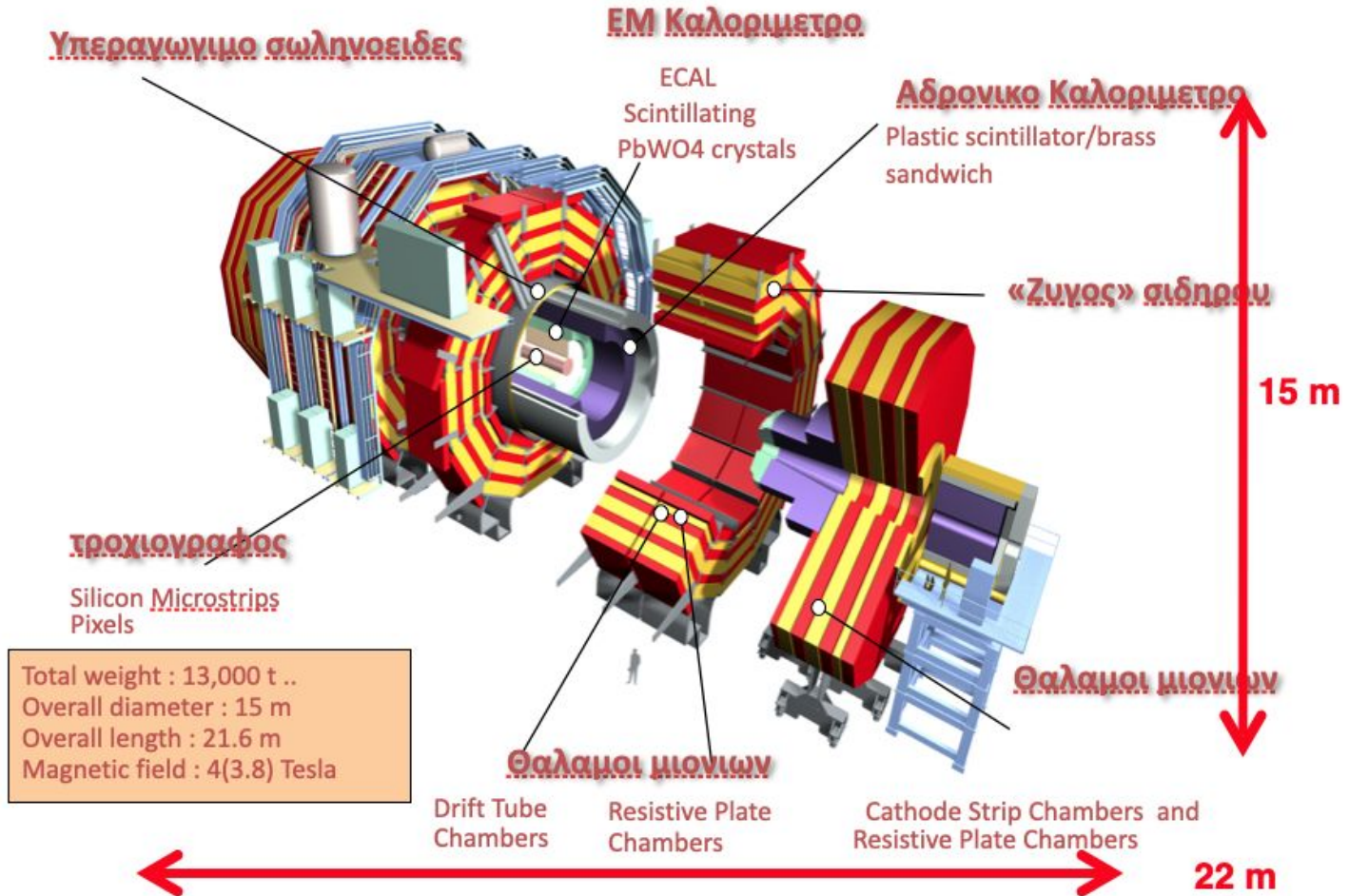
- >> The materials cost of the CMS detector was 550 million Swiss Francs.
- >> CMS is a collaboration of more than 2,800 scientists, including around 970 students.
- >> CMS involves the work of people in 191 institutes in 43 countries.

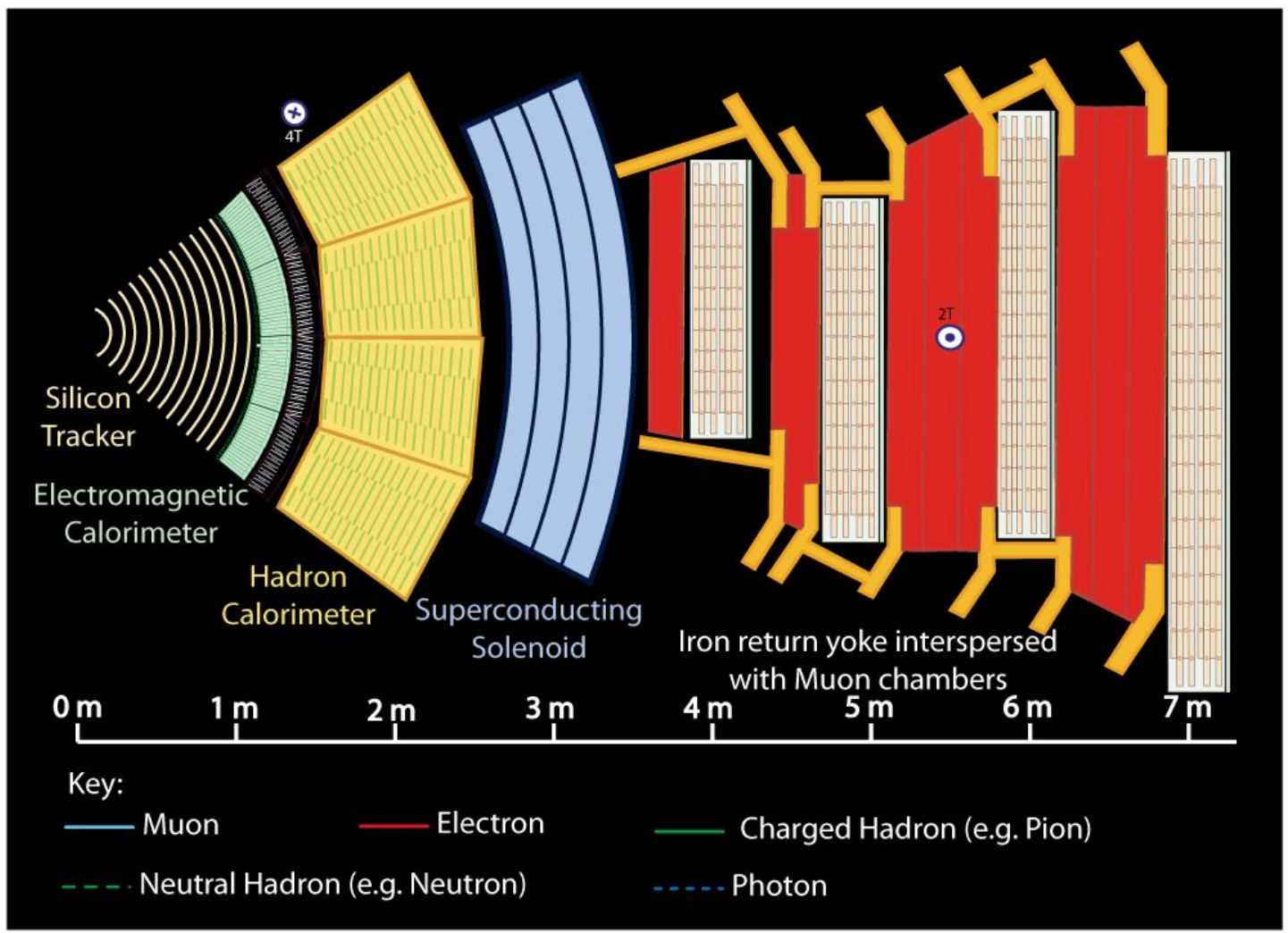
Building of 5 floor

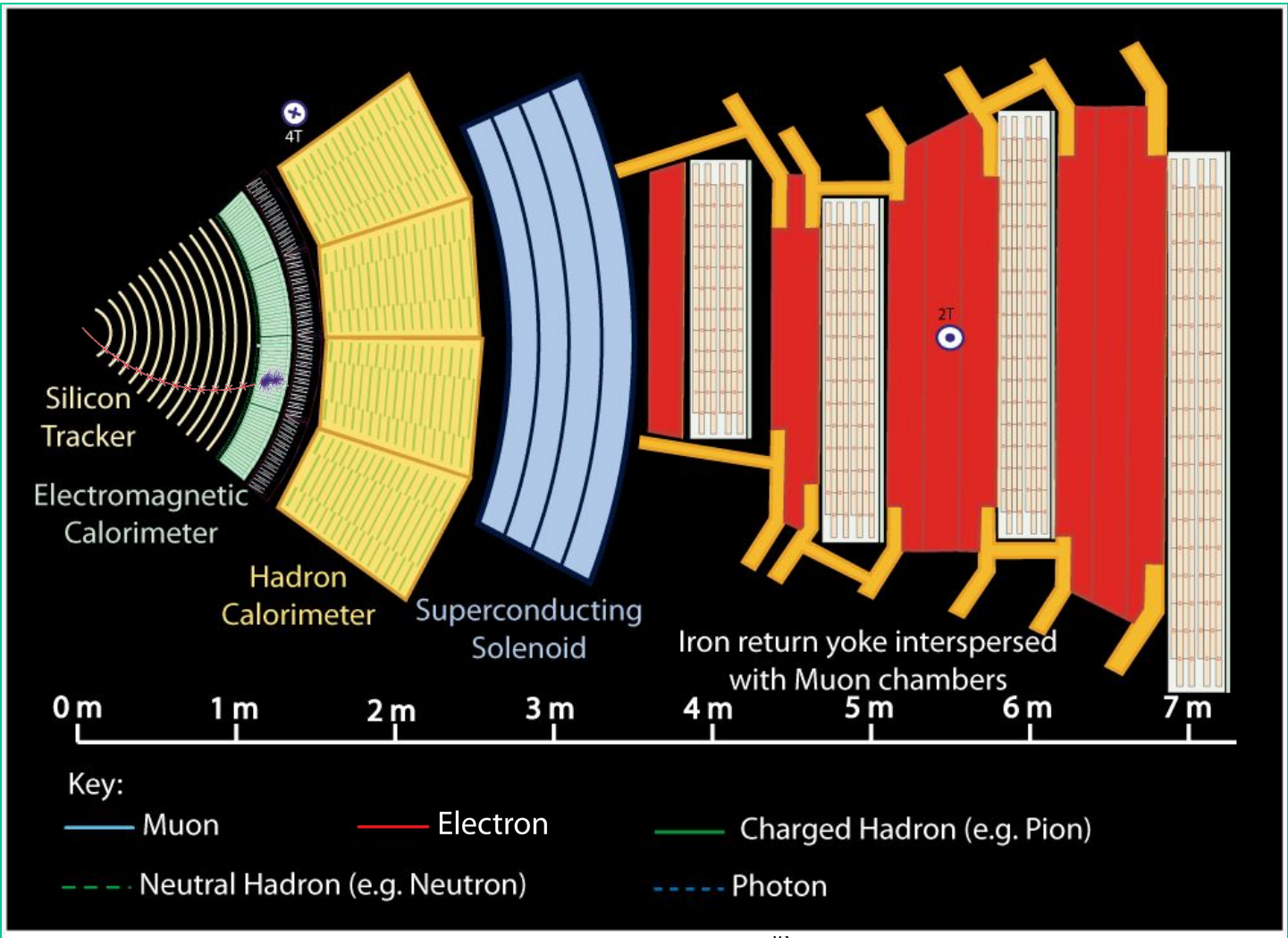
ATLAS

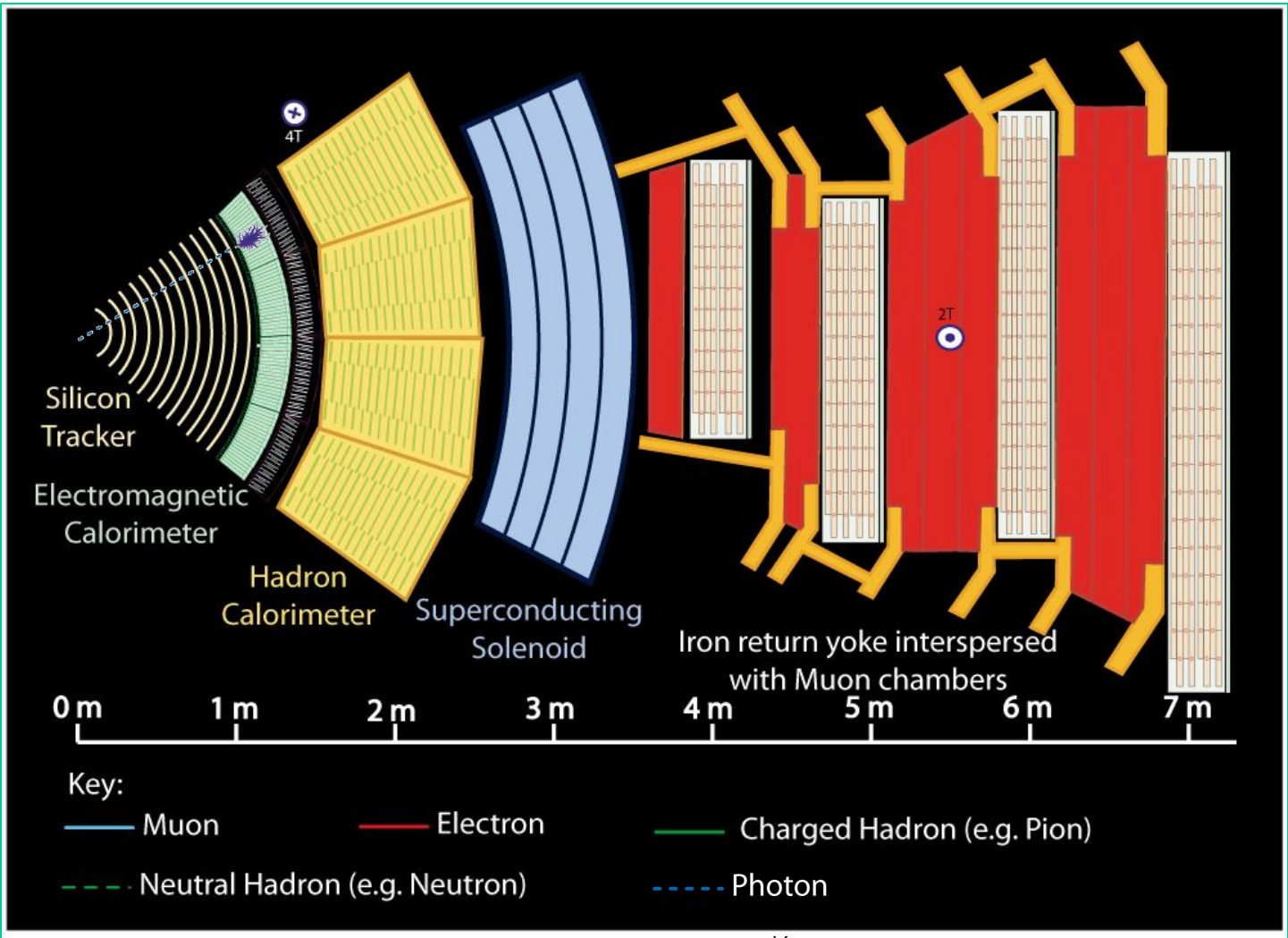
CMS

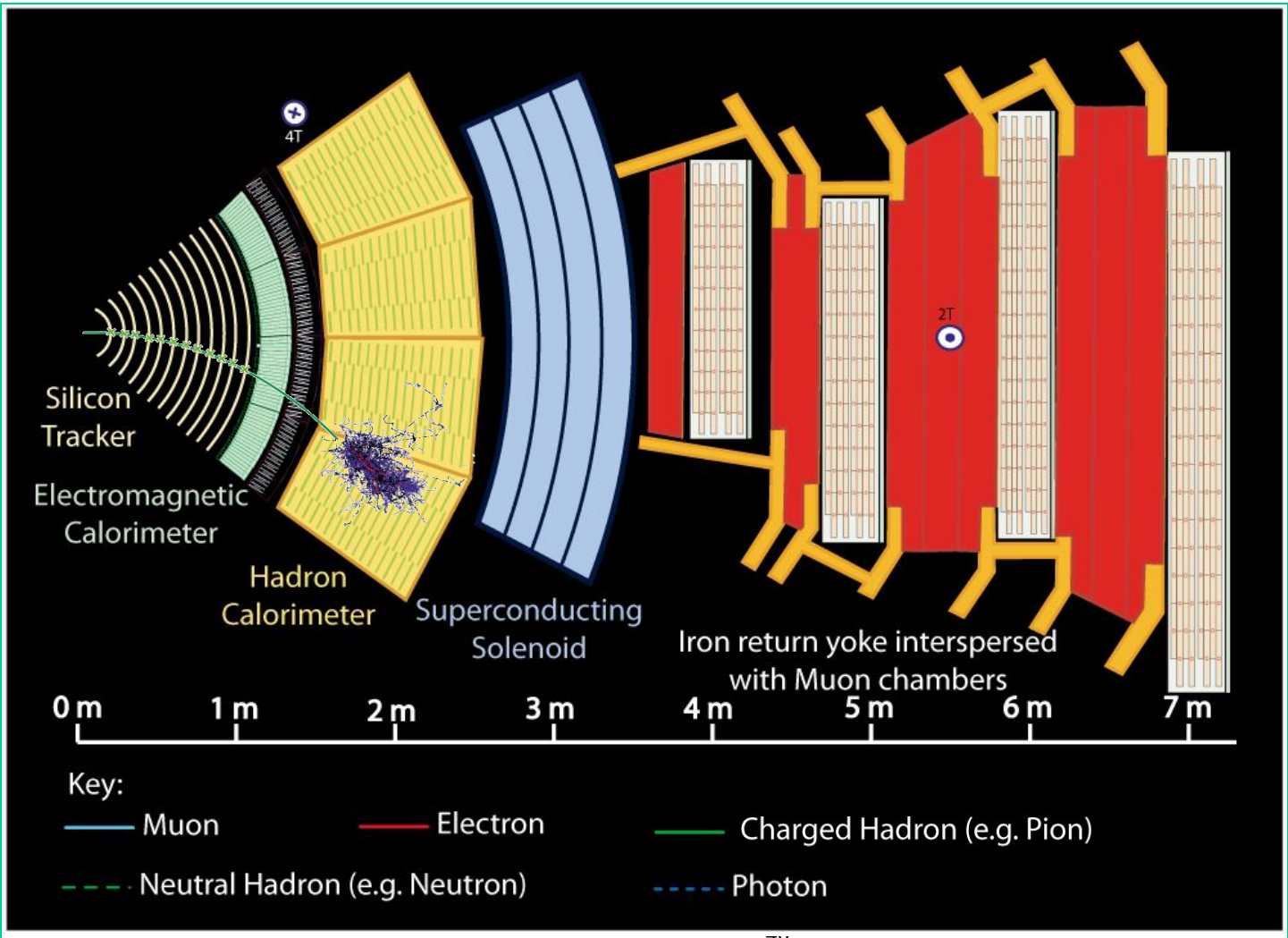


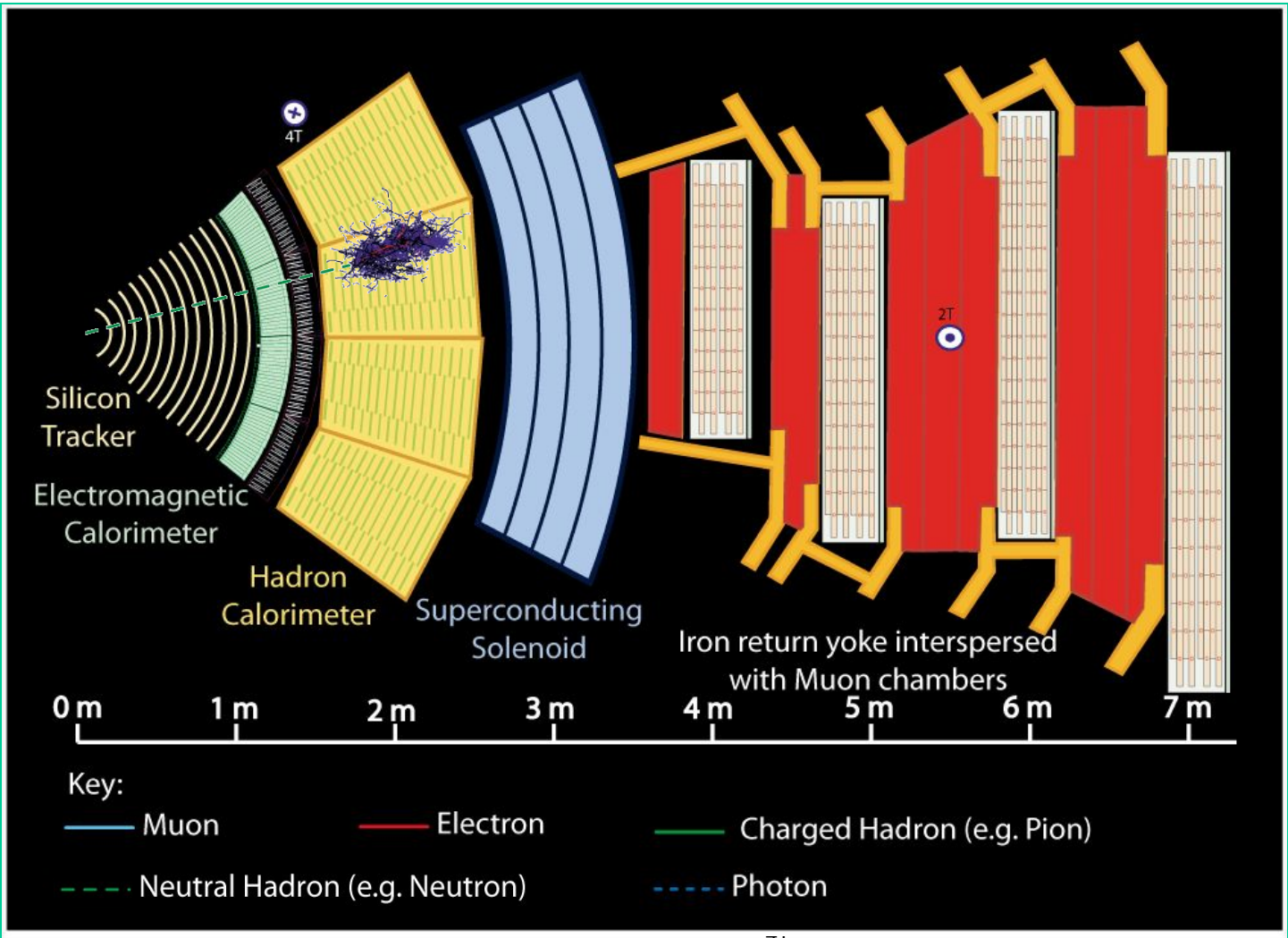


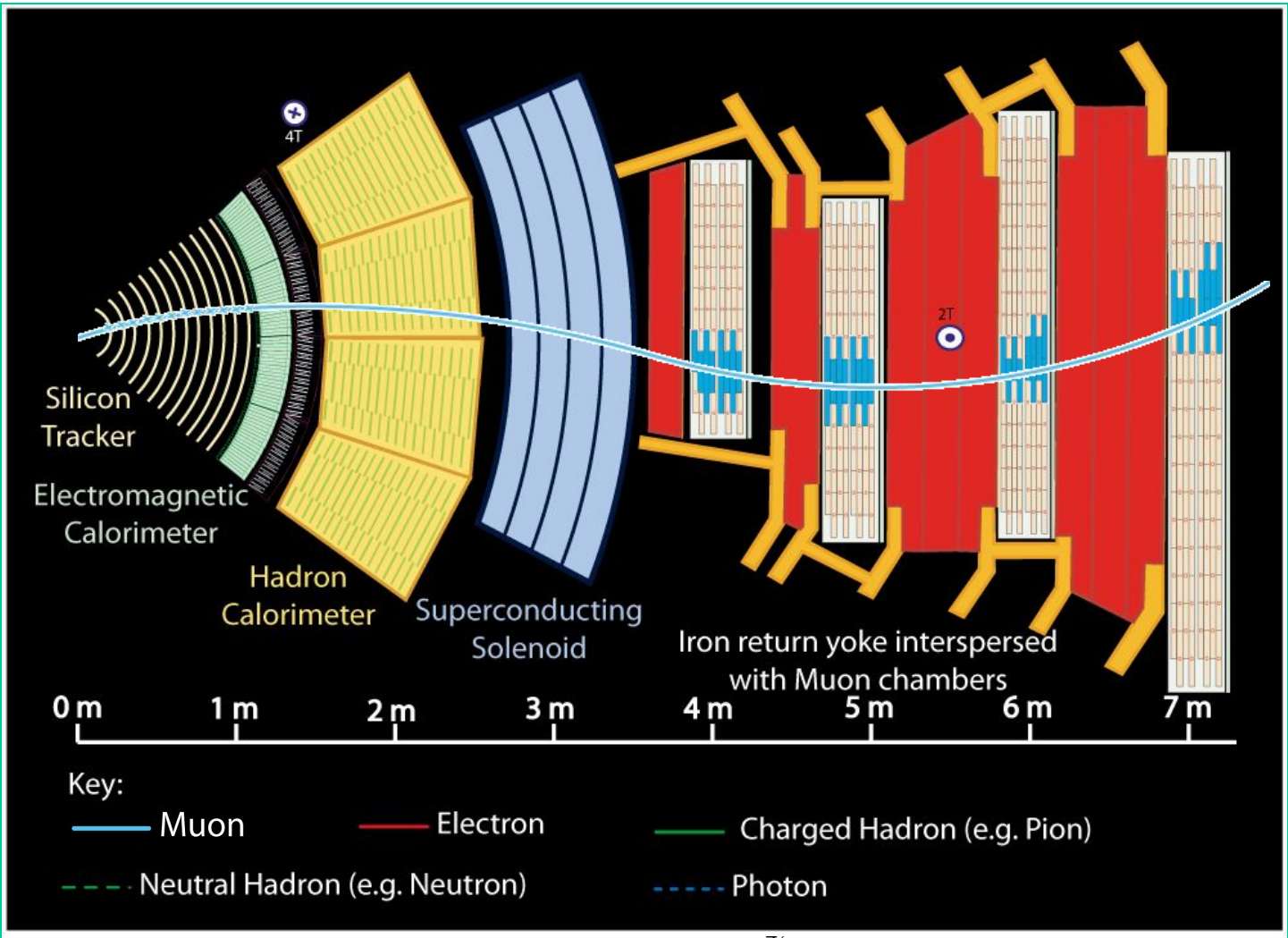












Σύστημα Σκανδαλισμού

Στο CMS, πρωτόνια συγκρούονται κάθε 25ns (40M φορές το δευτερόλεπτο)

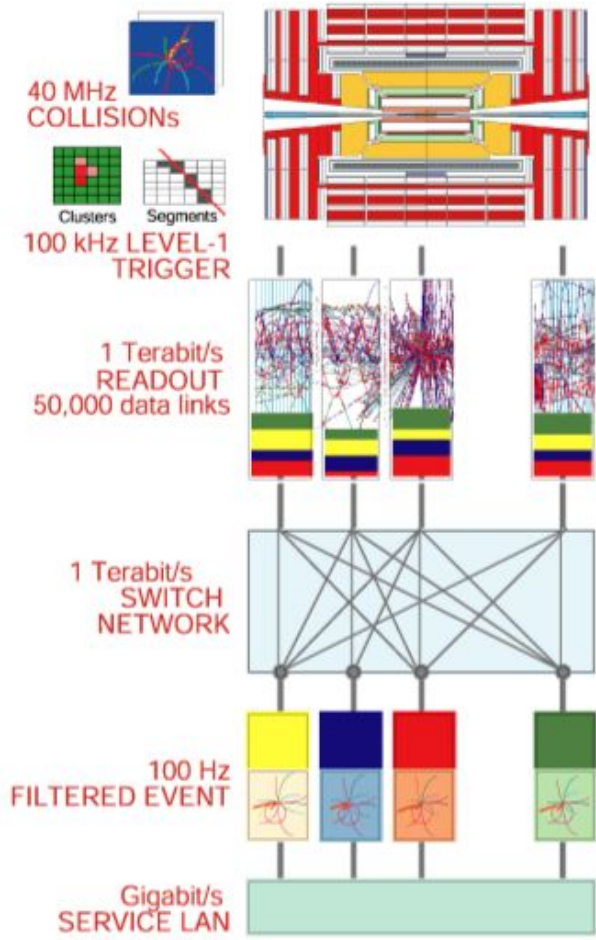
Κάθε σύγκρουση παράγει ~1 Mbyte δεδομένων

Το σύστημα σκανδαλισμού «trigger» αποφασίζει γρήγορα εάν η σύγκρουση παρήγαγε κάτι ενδιαφέρον:

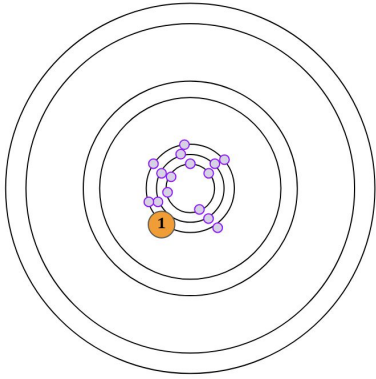
- ❖ ΝΑΙ, το «γεγονός» καταγράφεται
- ❖ ΟΧΙ, το «γεγονός» πετιέται

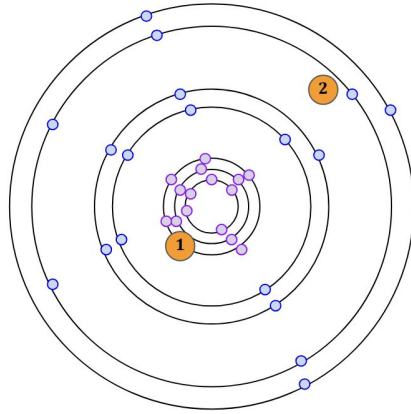
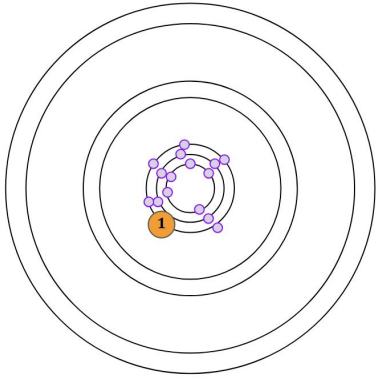
Τα ενδιαφέροντα γεγονότα παράγονται με συχνότητα 1:10M

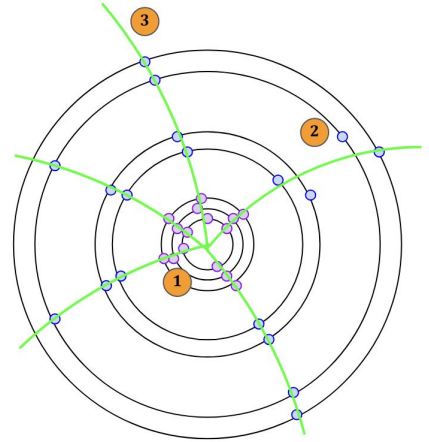
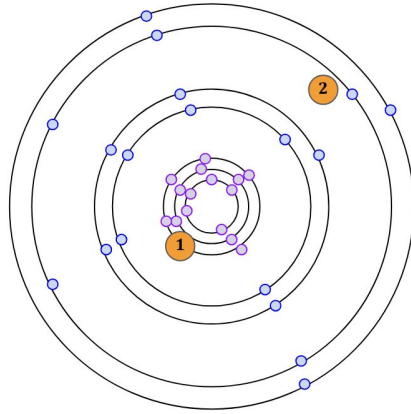
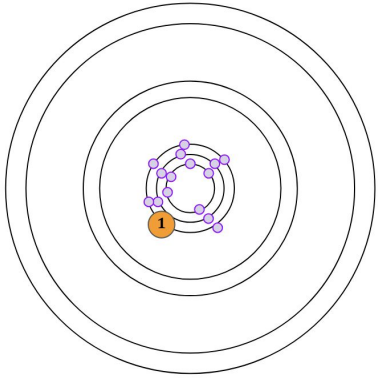
Ακόμη και με αυτούς τους περιορισμούς, τα καταγραφόμενα δεδομένα ξεπερνούν κάθε χρόνο τα 10000000 GBytes (1 PByte)

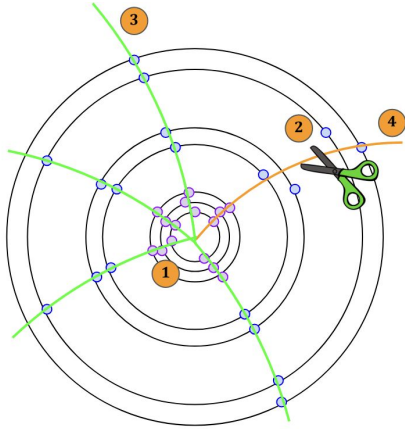
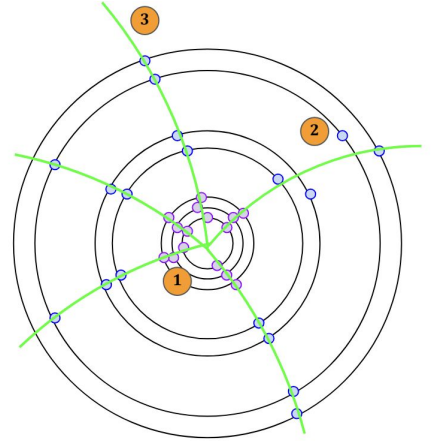
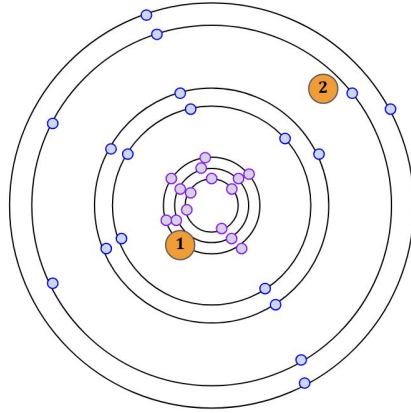
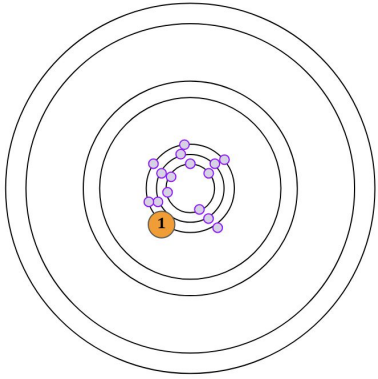


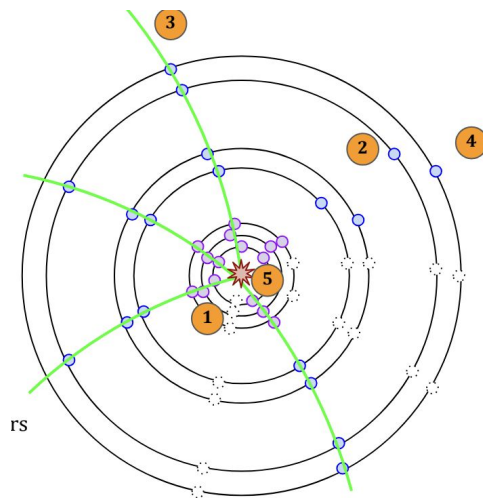
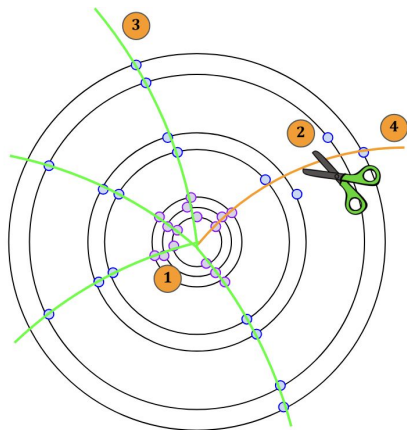
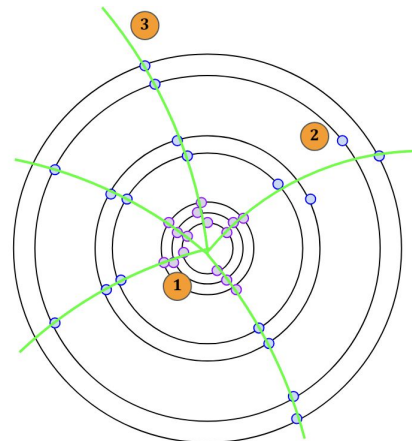
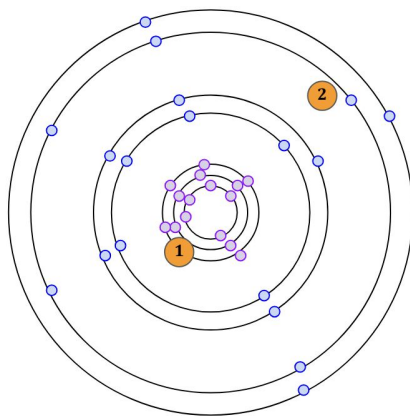
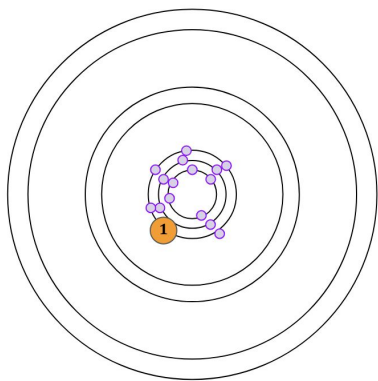
Ανακατασκευή σήματος π.χ. τροχιάς







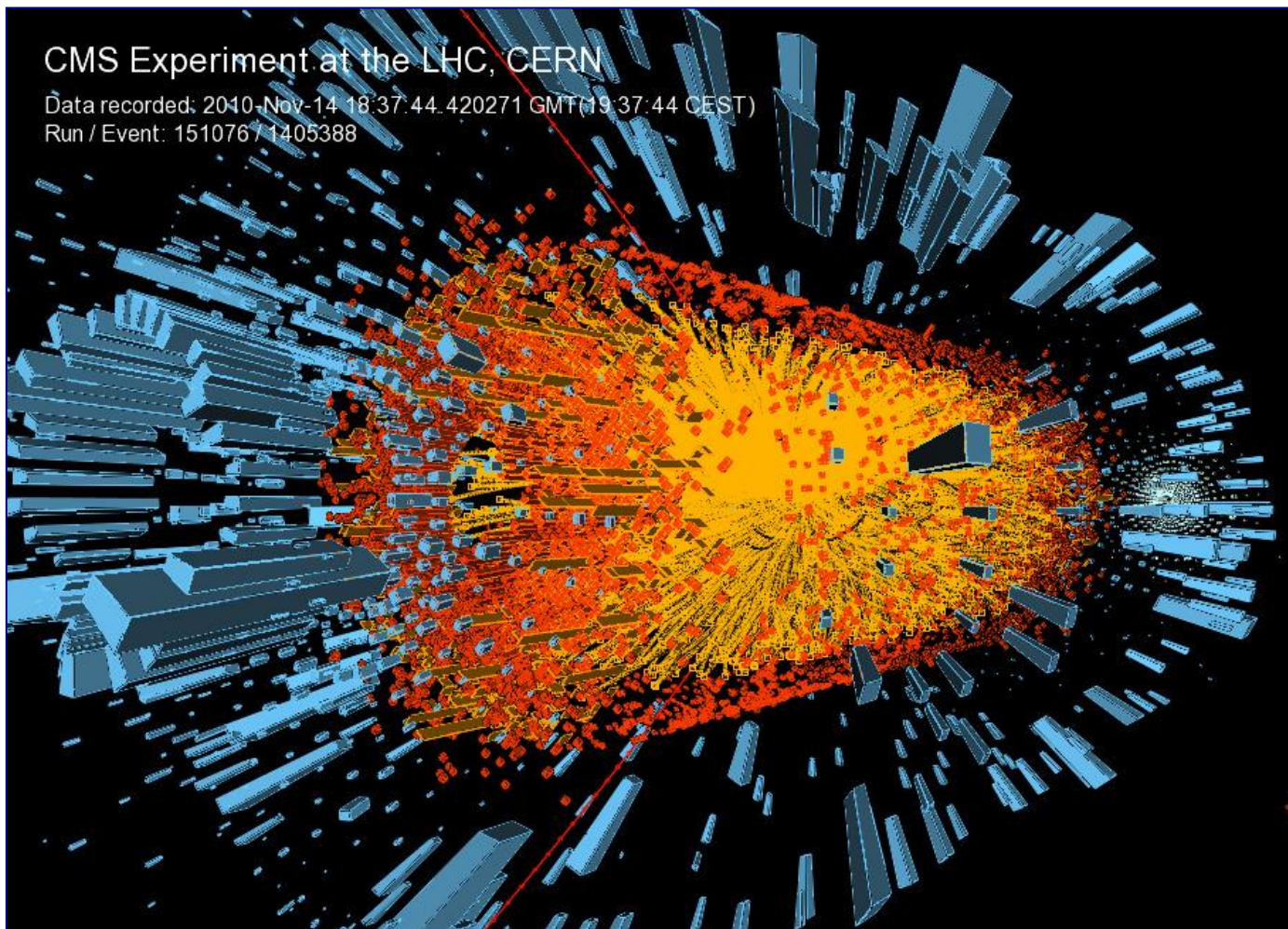




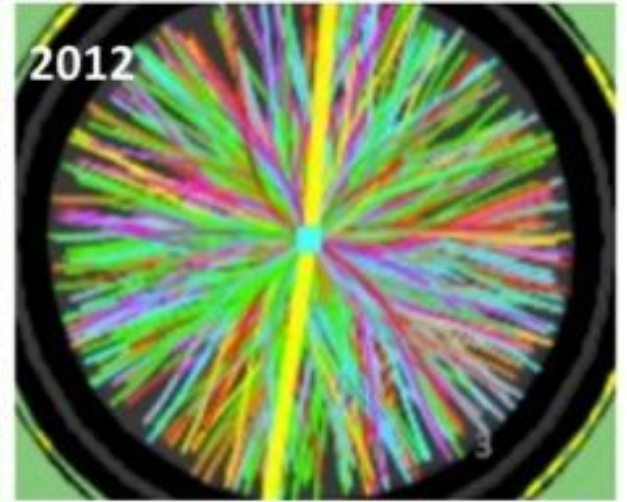
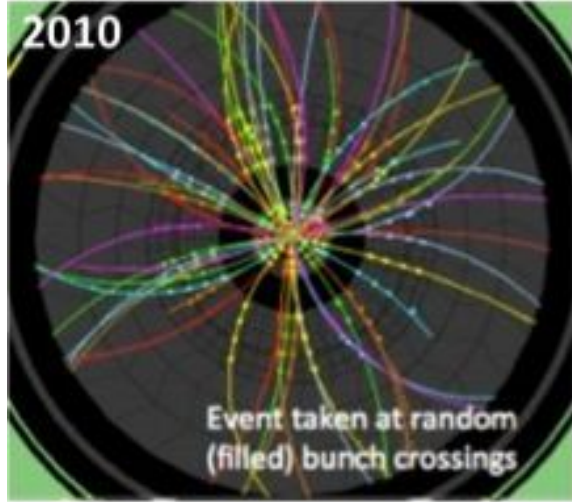
CMS Experiment at the LHC, CERN

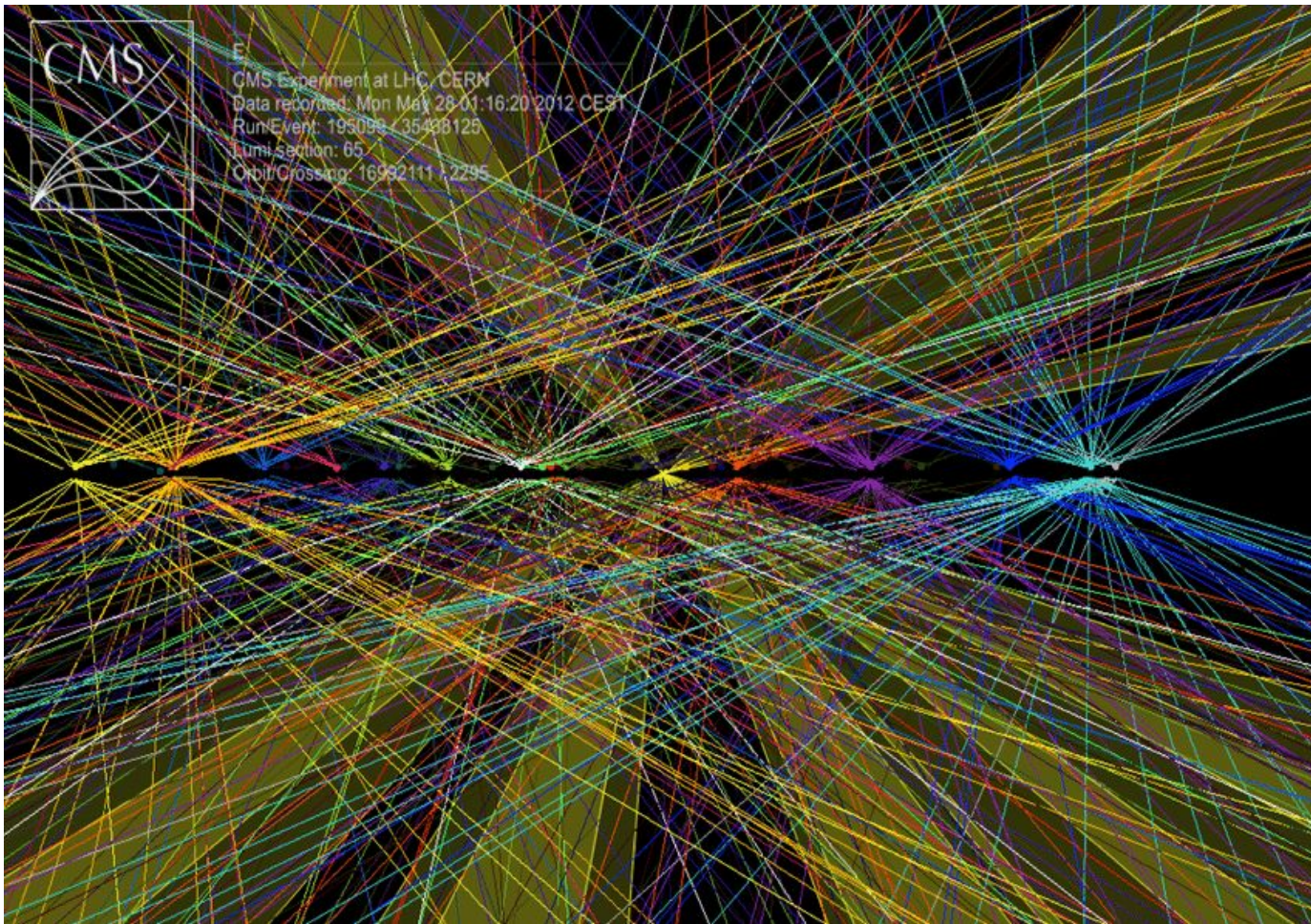
Data recorded: 2010-Nov-14 18:37:44.420271 GMT(19:37:44 CEST)

Run / Event: 151076 / 1405388



Pile-up: όλο και πιο δύσκολος ο διαχωρισμός





Αρχή κατασκευής CMS



CMS cavern



Transporting and constructing the CMS solenoid



“Swivelling the CMS solenoid”



Coil is constructed vertically but needs to be horizontal!

Inserting the CMS solenoid into the yoke



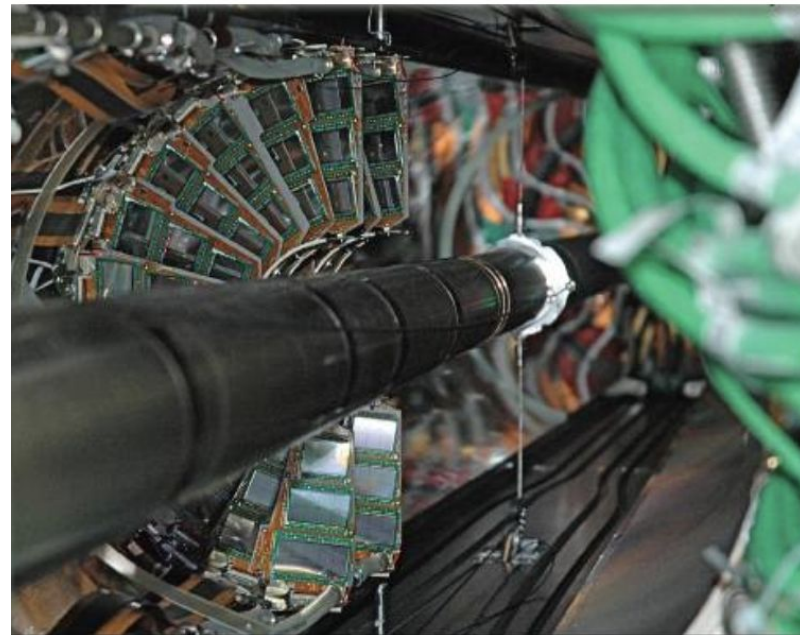
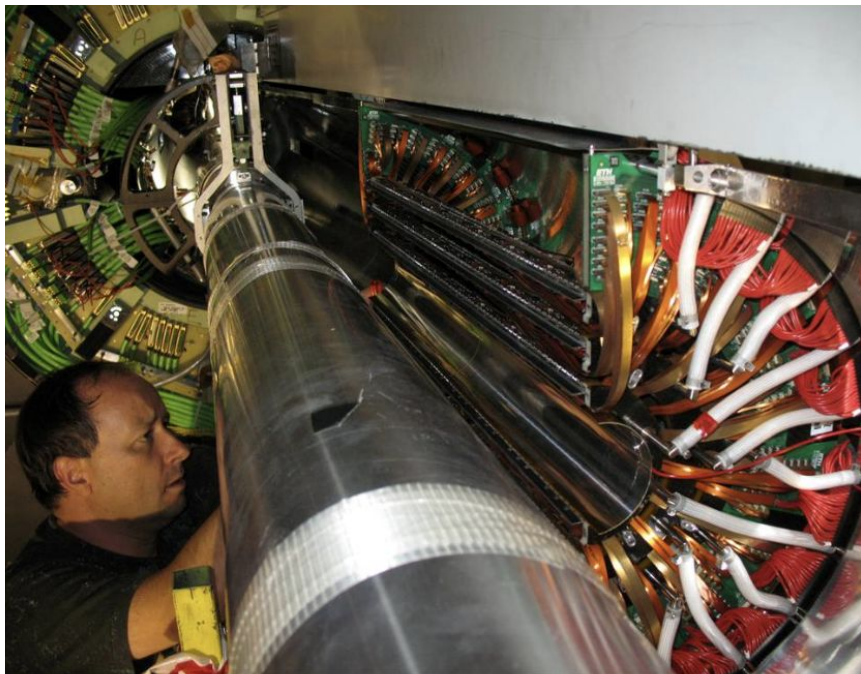
Lowering CMS Underground



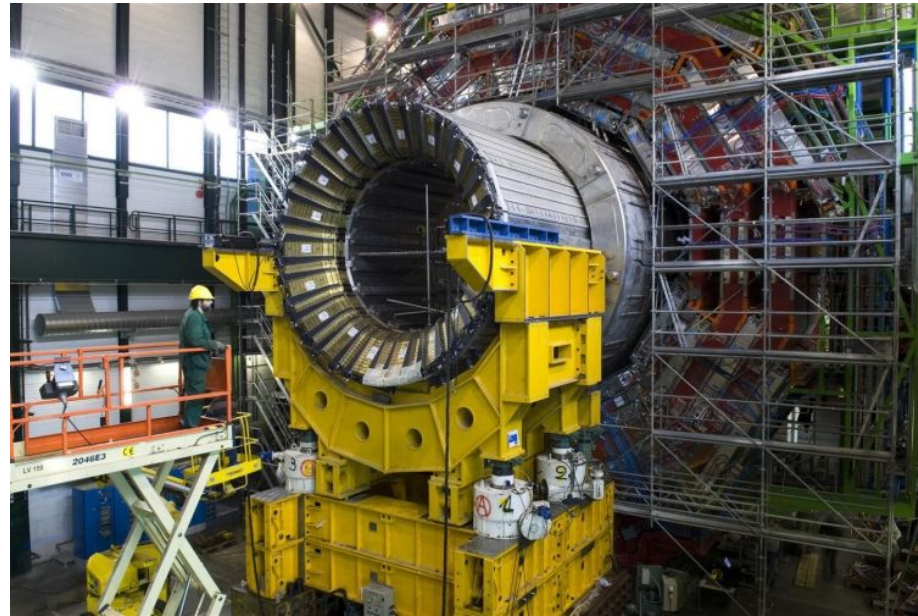
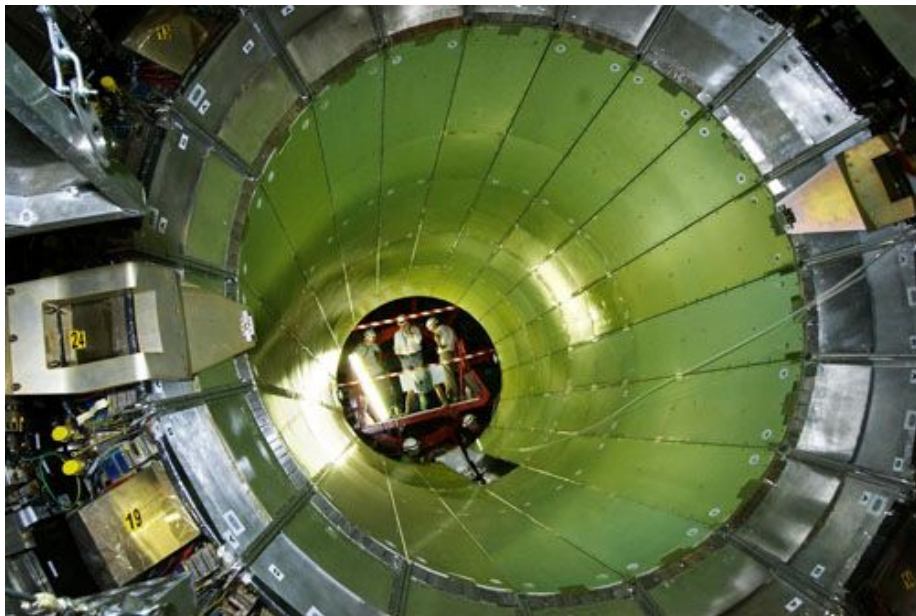
Lowering CMS Underground



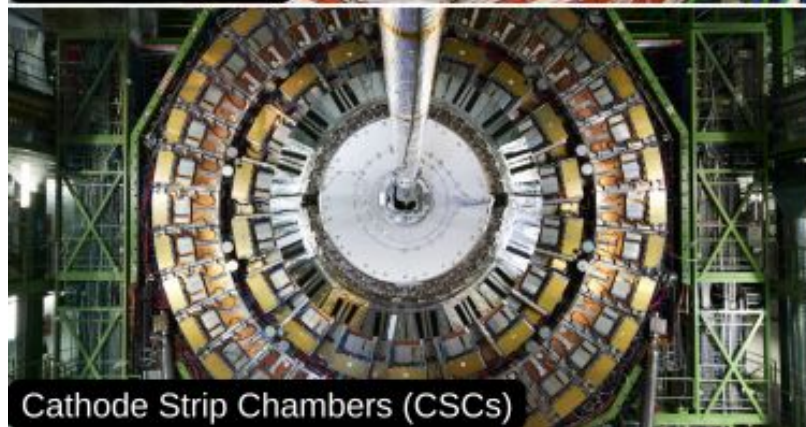
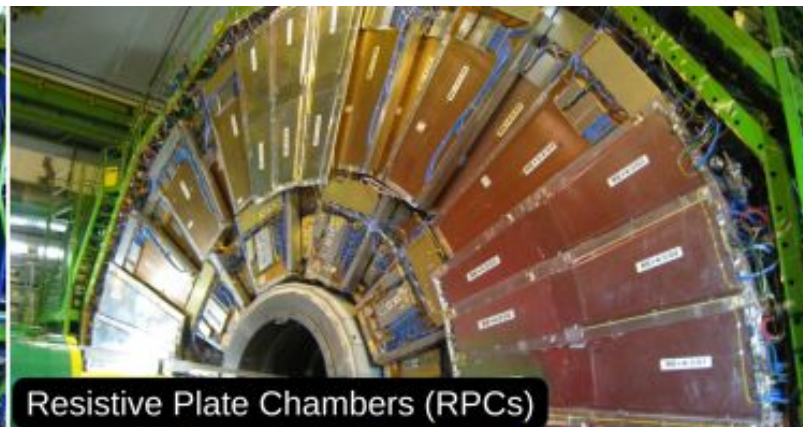
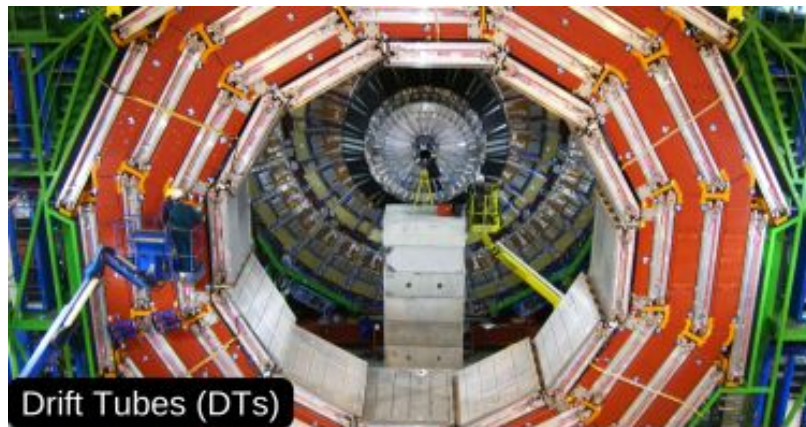
Εγκατάσταση τροchioγράφου



Εγκατάσταση καλοριμέτρων



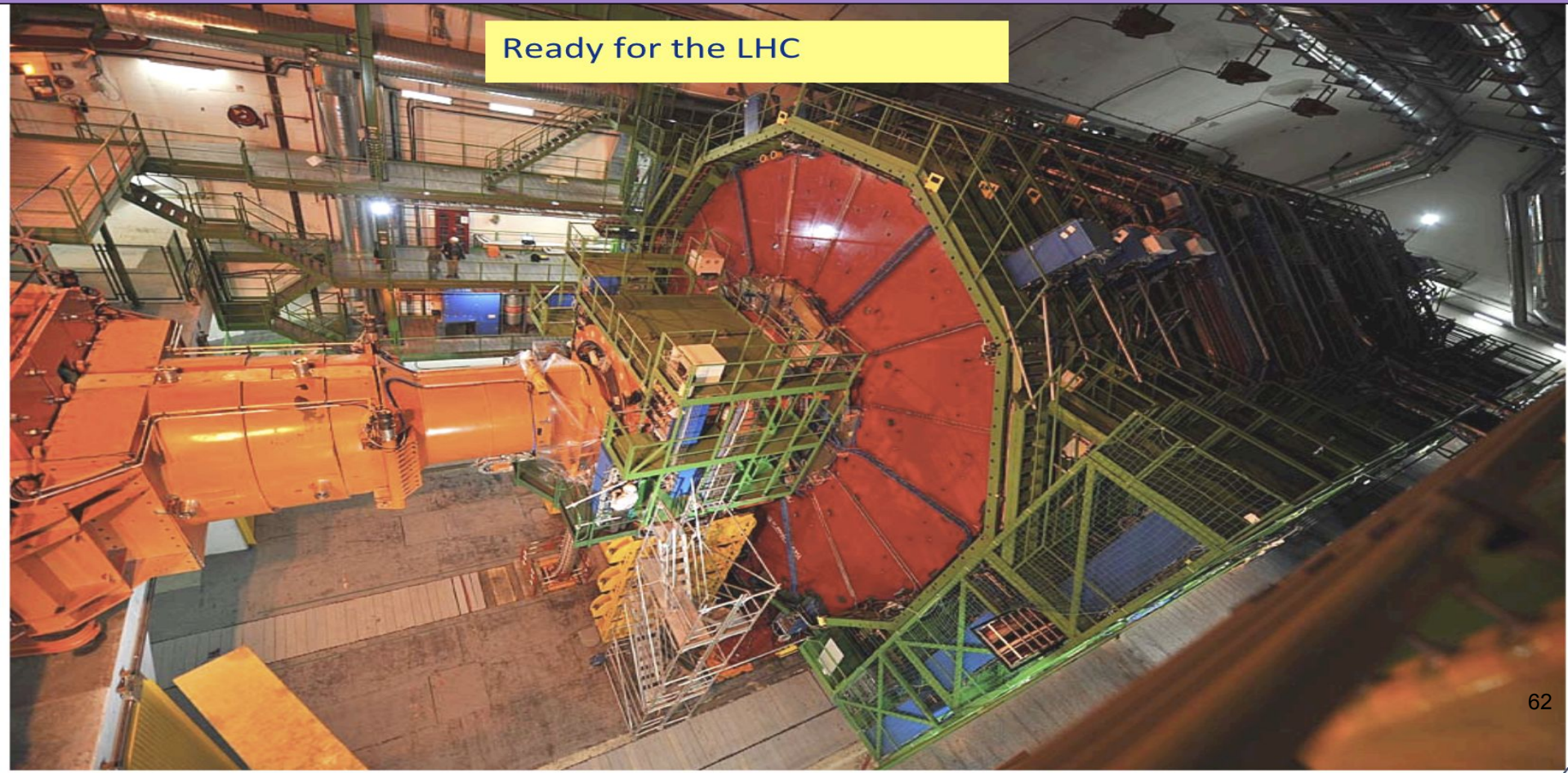
Θάλαμοι μιονίων



CMS Completed!

August 25, 2008 - 16 years after its Letter of Intent

Ready for the LHC





Phase-2 Upgrade: that was fun! let's do it again!

Trigger/HLT/DAQ

- Track information in L1-Trigger
- L1-Trigger: 12.5 μ s latency – output 750 kHz
- HLT output 7.5 kHz

Barrel ECAL/HCAL

- Replace FE/BE electronics
- Lower ECAL operating temp. (8 °C)

Muon Systems

- Replace DT & CSC FE/BE Electronics
- Complete Muon coverage in region $1.5 < \eta < 2.4$

New Endcap Calorimeters

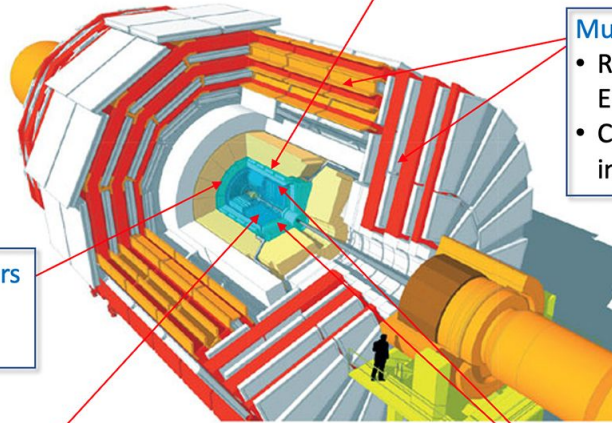
- High granularity
- 3D capable

New Tracker

- Rad. tolerant – high granularity – significant less material
- 40 MHz selective readout ($p_T > 2$ GeV) in Outer Tracker for L1 -Trigger
- Extended coverage to $\eta=4$

New Precision Timing Detector

- Barrel: Crystal +SiPM
- Endcap: Low Gain Avalanche Diodes



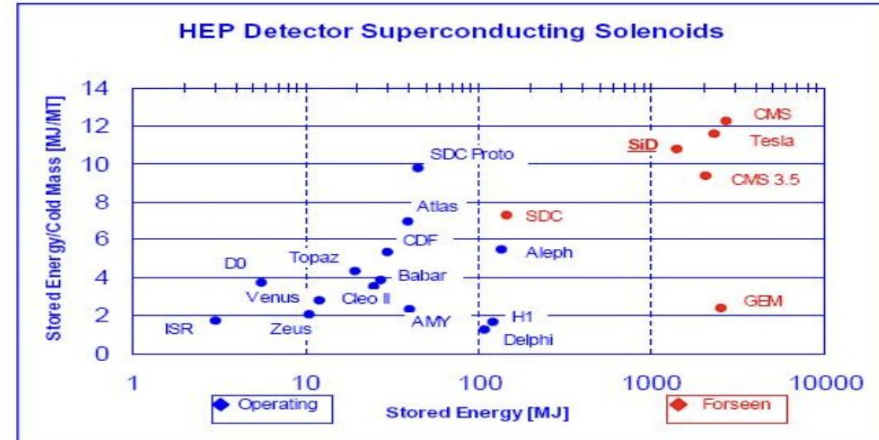
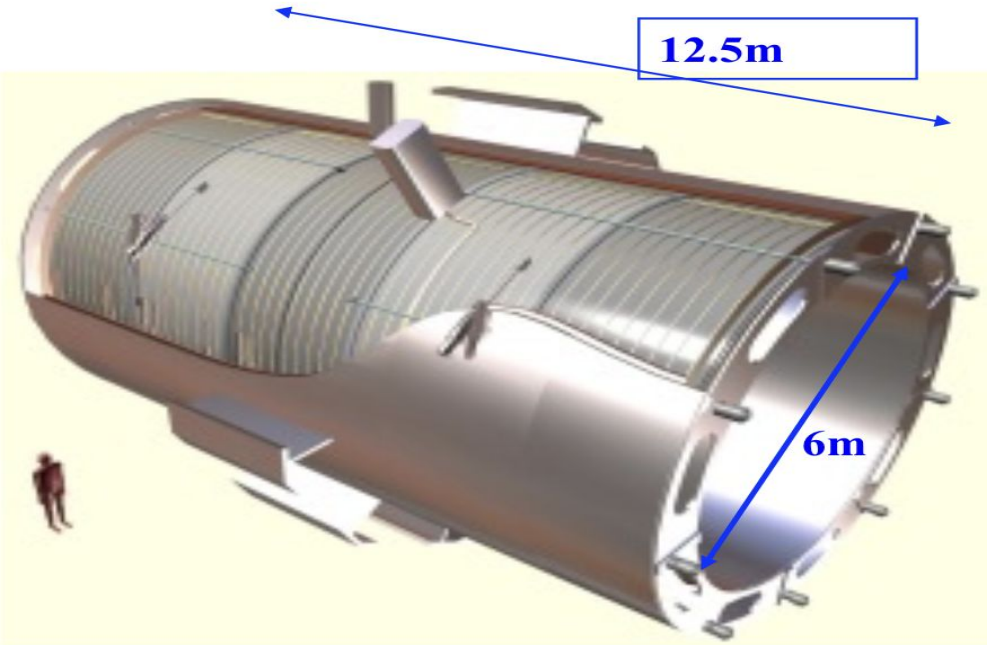
Ευχαριστώ για την προσοχή σας

stella.orfanelli@cern.ch

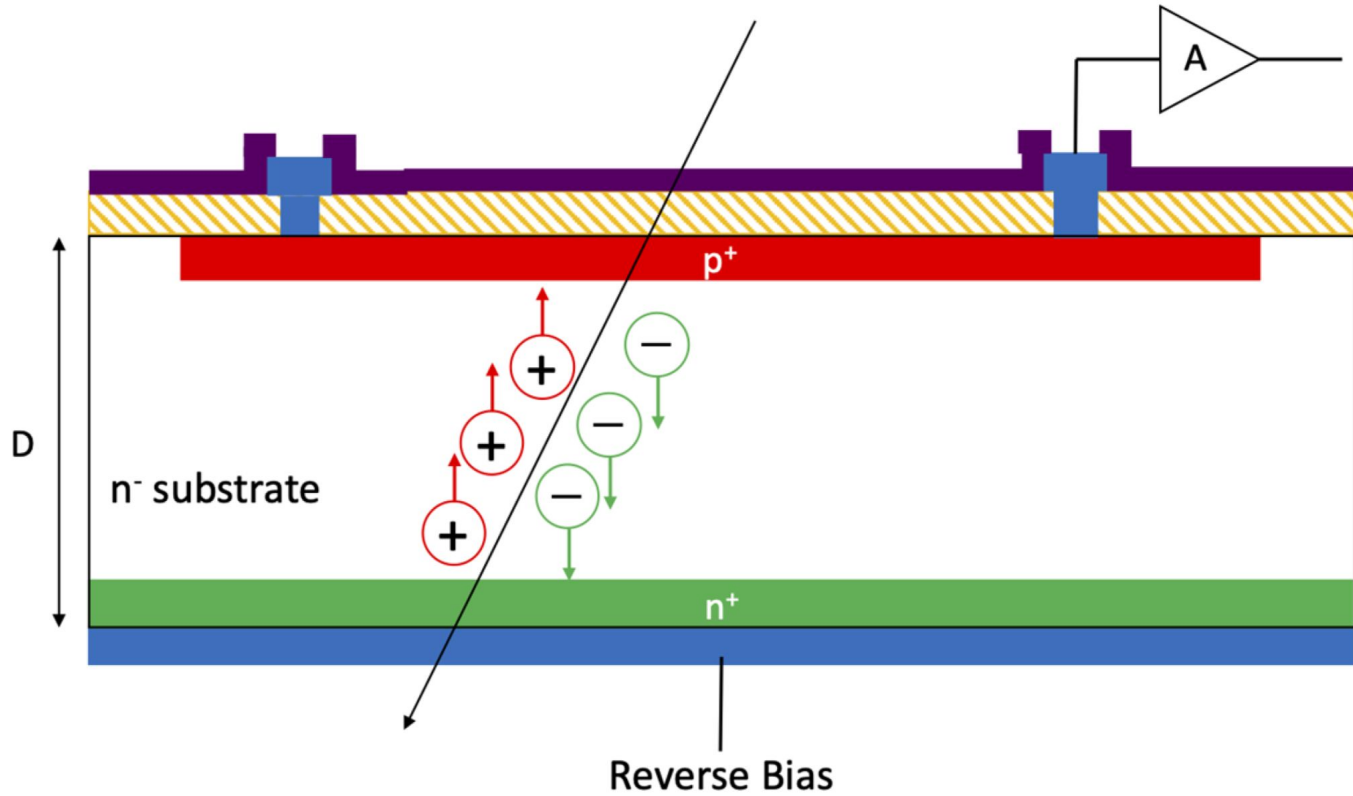
Material from talks from: A. Tsirou, E. Gazis, A. Kerezis, T. Alexopoulos, D.Barney

Solenoid

- diameter = 6 m (20 ft)
- Largest one ever built
- stores 2.7 GJ of energy

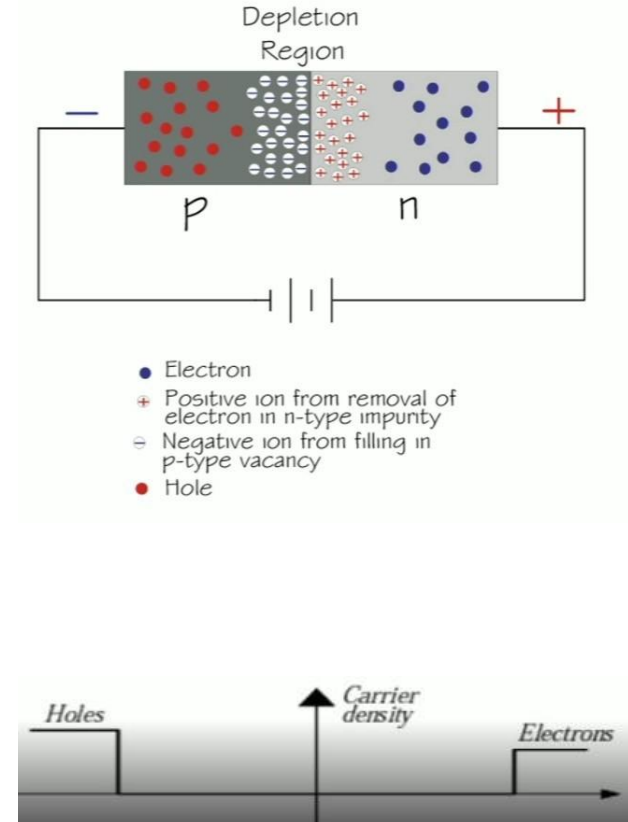


Silicon Detector



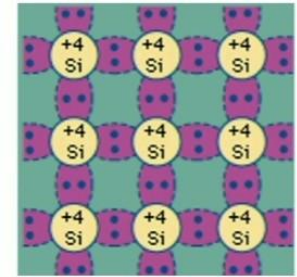
Silicon Detector

- ▶ Αν ενώσουμε τις επαφές p και n τότε έχουμε μια δίοδο
- ▶ Στην περιοχή της ένωσης τα ηλεκτρόνια και οι οπές εξουδετερώνονται μεταξύ τους
- ▶ Στην περιοχή που πλέον δεν υπάρχουν charge carriers, ένα φορτισμένο σωματίδιο εισέρχεται και δημιουργεί ζεύγος οπής – ηλεκτρονίου και άρα σήμα

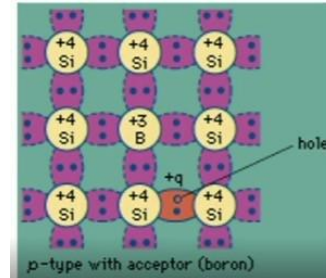
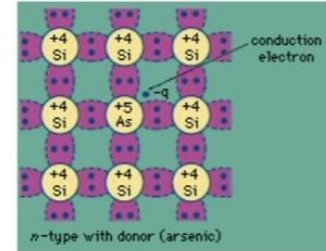


Dopping

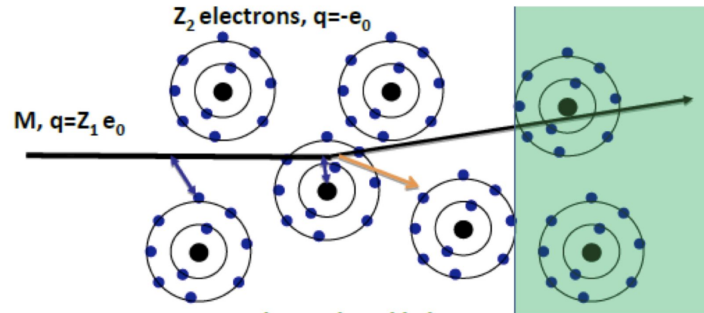
- ▶ Λόγω ύπαρξης πολλών ζευγών οπών – ηλεκτρονίων στο πυρίτιο σε θερμοκρασία δωματίου, για τη χρήση του ως ανιχνευτή χρησιμοποιούμε τη μέθοδο των προσμίξεων
- ▶ Πρόσμιξη του πυριτίου με αρσενικό (πεντασθενές) → αγωγός τύπου n, δηλαδή περιέχει περισσότερα ηλεκτρόνια
- ▶ Πρόσμιξη του πυριτίου με βόριο (τρισθενές) → αγωγός τύπου p, δηλαδή περιέχει λιγότερα ηλεκτρόνια



doping



Electromagnetic Interactions

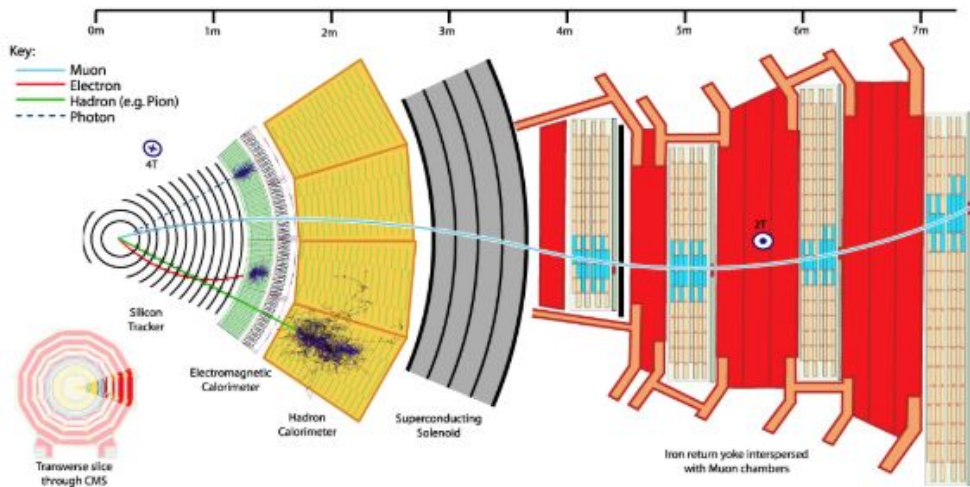


Interaction with atomic electrons – **ionization** and **excitation** – produces measurable signals

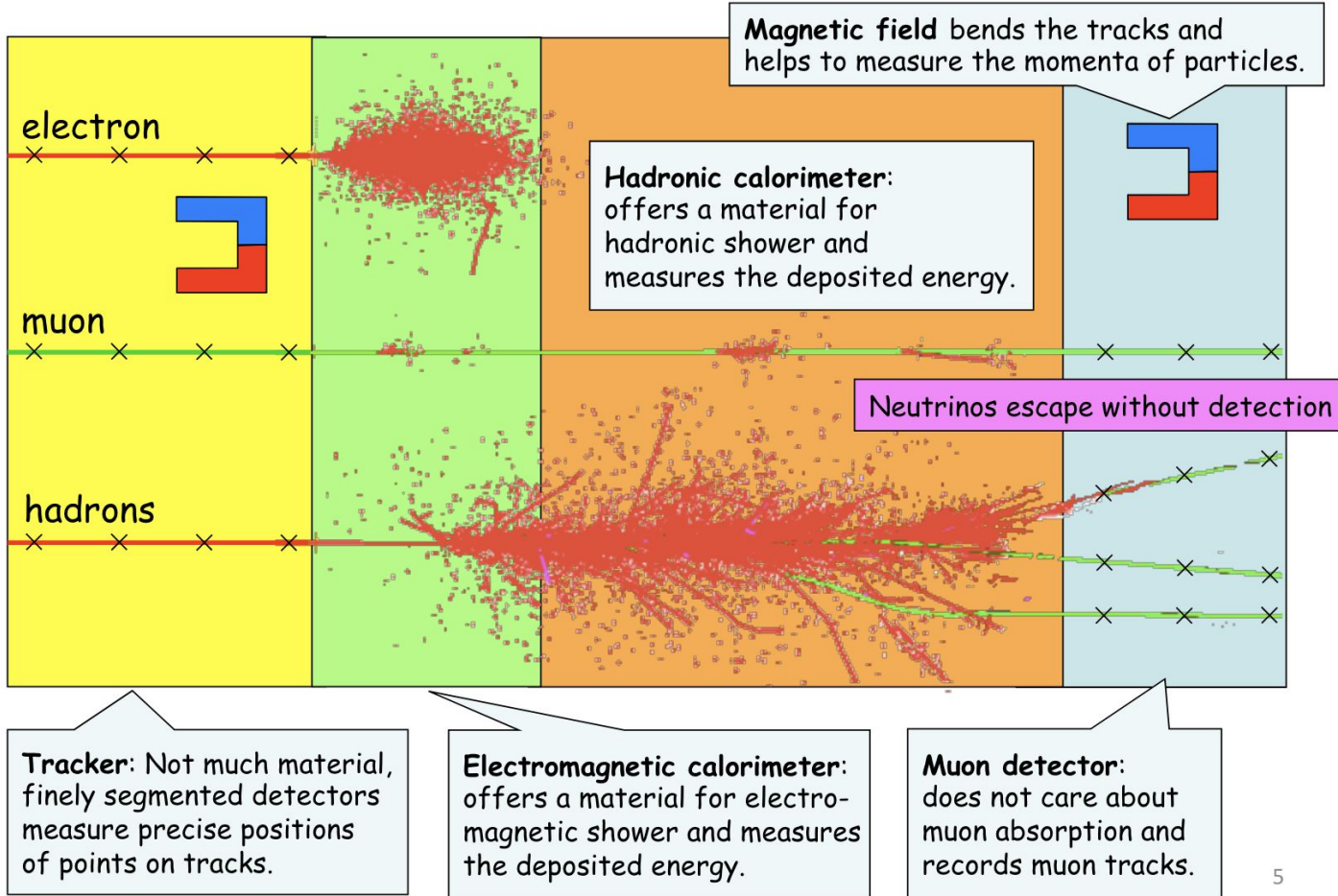
Interaction with atomic nucleus – **bremstrahlung** – shower production

If particle velocity is high enough (greater than speed of light in the medium) **cherenkov radiation**

Particle	Detection method
Photon	No signal in tracker; signal in ECAL; no signal in HCAL or muon chambers
Electron/positron	Signal in tracker; signal in ECAL; no signal in HCAL or muon chambers
Charged hadron (e.g. p^+ , π^- , K^+ ...)	Signal in tracker; essentially no signal in ECAL; signal in HCAL; no signal in muon chambers
Neutral hadron (e.g. n...)	No signal in tracker; no signal in ECAL; signal in HCAL; no signal in muon chambers
Muon	Signal in tracker; no signal in ECAL or HCAL; signal in muon chambers
Neutrinos, SUSY particles....	No signal in any sub-detector; presence inferred from missing energy

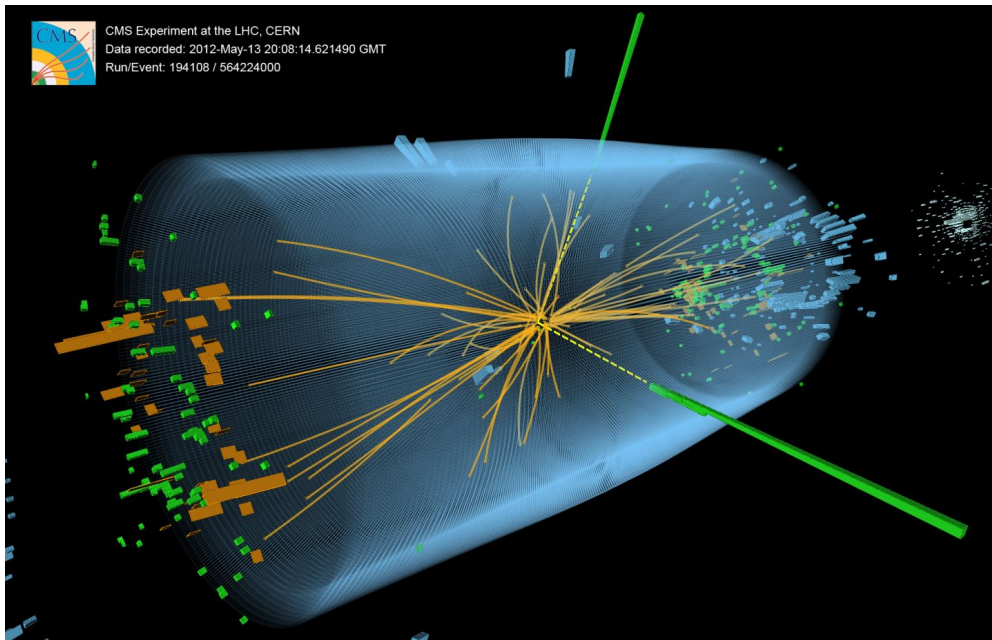


Here is the general strategy of a current detector to catch almost all particles:

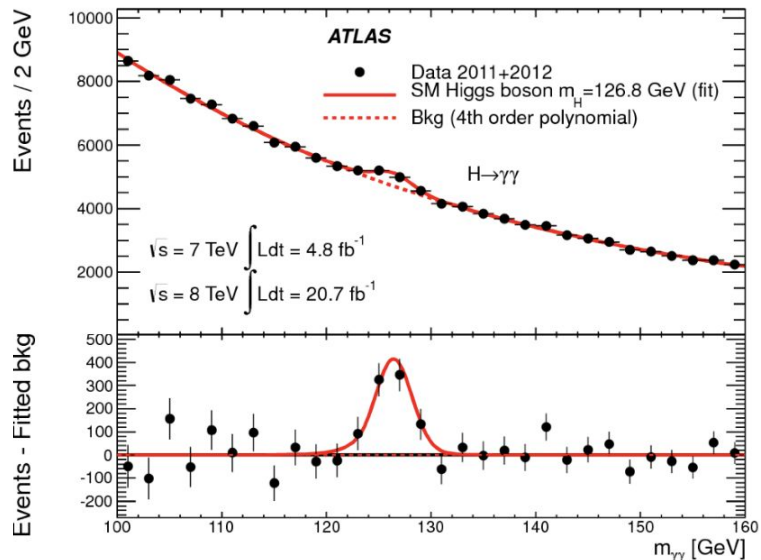




CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



CMS event display of a candidate Higgs boson decaying into two photons, one of the two decay channels that were key to the discovery of the particle.



Διακυμάνσεις στην Απώλεια Ενέργειας

- ❖ Ένας πραγματικός ανιχνευτής (περιορισμένης κατάτμησης) δεν μπορεί να μετρήσει την απώλεια ενέργειας μία φορά με ακρίβεια
 - Μετρά την ενέργεια E που εναποτίθεται σε στρώματα πεπερασμένου πάχους x .
 - Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις δειγματοληψία από μια κατανομή απώλειας ενέργειας
- ❖ Για λεπτά στρώματα υλικού ή υλικά χαμηλής πυκνότητας, η κατανομή της απώλειας ενέργειας παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις προς υψηλές απώλειες, τις λεγόμενες ουρές Landau.
- ❖ Για παχιά στρώματα και υλικά υψηλής πυκνότητας, η κατανομή της απώλειας ενέργειας δείχνει μια κατανομή που μοιάζει περισσότερο με Gauss (πολλές συγκρούσεις, κεντρικό οριακό θεώρημα)

